



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN,
ESPECIALIDAD EN SONIDO E IMAGEN

Título del proyecto:

***“ESTUDIO DE LA REPRODUCCIÓN DEL COLOR EN
ROTULADORES PROFESIONALES USADOS EN
DISEÑO GRÁFICO”***

Ana Marqués Plaza

Begoña Hernandez Salueña

Pamplona, 5 de Julio 2010

INDICE

INDICE

1.	OBJETIVO DEL PROYECTO	7
2.	INTRODUCCIÓN.....	9
2.1.	LA LUZ.....	9
2.1.1.	Espectro electromagnético	9
2.1.2.	Espectro visible	11
2.1.3.	Interacción entre la luz y los objetos	12
2.1.3.1.	Reflexión.....	12
2.1.3.1.1.	Difusor perfecto	13
2.1.3.2.	Refracción	13
2.1.3.3.	Transmisión.....	14
2.1.3.4.	Absorción.....	14
2.1.4.	Fuentes de luz.....	15
2.1.4.1.	Cuerpo negro.....	15
2.1.4.2.	Illuminantes estándares CIE.....	16
2.2.	LA VISIÓN DEL COLOR.....	18
2.2.1.	Fisiología, el ojo humano	18
2.2.2.	Proceso visual y sus características.....	18
2.2.3.	Anomalías o defectos en la visión del color.....	22
2.2.4.	Observador estándar CIE	23
2.3.	ESPACIOS DE COLOR:.....	24
2.3.1.	Sistemas de ordenación del color que describen el color mediante números matemáticos.....	25
2.3.1.1.	Sistema CIE, valores triestímulo:.....	25
2.3.1.2.	Espacio xy (Coordenadas de cromaticidad)	26
2.3.1.3.	Espacio CIELuv:	27
2.3.1.4.	Espacio CIELab	28
2.3.1.5.	Espacio CIE L* C _{h_{ab}} Polar.....	30
2.3.2.	Sistemas de ordenación del color que están basados en atlas de colores	30
2.3.2.1.	Sistema Munsell.....	30
2.3.2.2.	Sistema Pantone:	33
2.3.3.	Ecuaciones de diferencia de Color CIE.....	33
2.4.	INSTRUMENTOS PARA LA MEDIDA DEL COLOR.....	35
2.5.	EL COLOR COMO FENOMENO SENSORIAL	37
2.5.1.	Colores primarios y mezclas	38
2.5.1.1.	Mezcla de color aditiva	38
2.5.1.2.	Mezcla de color sustractiva	39
2.5.2.	Colorantes	40
2.5.3.	Uso de rotuladores para diseño gráfico	40
2.6.	TEORIA KUBELKA - MUNK.....	41
2.6.1.	Aplicaciones de la teoría K-M	45
2.7.	PREDICCIÓN DE COLOR	47
2.7.1.	Leyes de mezcla de color y teoría óptica	47
2.7.2.	Igualación del color utilizando la teoría K-M de constante única.....	48
2.7.3.	Predicción de la formula de color, utilizando datos de tres longitudes de onda	49
2.7.4.	Mezcla de Pantones.....	49
3.	METODO OPERATIVO:	52
3.1.	MATERIALES UTILIZADOS	52
3.1.1.	Espectrofotómetro CM-2500d	52
3.1.2.	Software SpectraMagicNX	52
3.1.3.	Rotuladores TRIA y complementos.....	54
3.1.4.	Pantone Color Cue 2	57

3.1.5.	Cabina de iluminación Macbeth Spectralight III	58
3.1.6.	Libro de Ishihara's test for colour Blindness	59
3.2.	MEDIDAS REALIZADAS CON EL ESPECTROFOTÓMETRO	60
3.3.	PARÁMETROS MEDIDOS.....	62
3.3.1.	Curvas de reflectancia	62
3.3.2.	Valores K/S con ajuste de la recta tendencia	63
3.3.3.	$L^*a^*b^*C$ y hab	63
3.3.4.	ΔE^* , Diferencia de cromática	63
3.3.5.	Comparación con el Pantone más cercano. Test de Color	63
3.4.	PREDICCIÓN DE COLOR	64
4.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	70
4.1.	ESTUDIO PRELIMINAR	70
4.2.	MUESTRAS Y MEDIDAS	70
4.3.	PARÁMETROS MEDIDOS.....	71
4.3.1.	Curvas de reflectancia espectral y muestras.....	71
4.3.2.	Valores $L^*a^*b^*$ y ΔE^*	85
4.3.3.	Test de color Pantone.....	100
4.3.4.	Evolución de los Valores K/S con el número de capas.....	123
4.3.5.	Predicción del color de una mezcla a partir de la combinación de los valores K/S de sus concentraciones (2 métodos).....	127
5.	CONCLUSIONES FINALES	150
6.	BIBLIOGRAFIA	152
7.	ANEXOS	153

OBJETIVO

1. OBJETIVO DEL PROYECTO

El trabajo que se pretende realizar en éste proyecto, es un estudio de la reproducción del color obtenido al utilizar rotuladores profesionales cuya principal aplicación es el diseño gráfico en una amplia gama de campos.

La labor de un diseñador en cualquier campo tanto artístico como tecnológico, comienza en un papel. El profesional del diseño debe usar a menudo para ello rotuladores que reflejen el color del producto que se desea. La manera en que este tipo de productos reproduce el color pertenece a la experiencia de cada diseñador pero no existen estudios que permitan abordar el fenómeno de una manera científica, que es lo que se pretende en este trabajo.

Conocer y usar bien el color, es esencial no solo para los artistas, sino también para los arquitectos y todo tipo de diseñadores que tienen que realizar bocetos lo más aproximados posibles a sus futuras obras o proyectos.

INTRODUCCIÓN

2. INTRODUCCIÓN

El color es una sensación visual que es percibida por los órganos visuales. Esta sensación, se origina por la estimulación de la retina del ojo. Es algo psicofísico, es decir, es una respuesta psicológica a un estímulo físico.

De todos modos, el color puede tener un significado diferente para cada persona; para un químico por ejemplo, el color puede ser un compuesto químico, un colorante o un pigmento, para un físico es una dispersión y absorción de la luz, para un fisiólogo en cambio es un complejo proceso en el cerebro que interpreta la señal del nervio. Para los artistas y mucha otra gente, el color es el medio para expresarse y crear sensación en la mente del observador.

La percepción del color, implica una serie de hechos que son interdisciplinarios por naturaleza; una fuente de luz, un objeto y un observador. El haz de luz que ilumina el objeto, se modifica dependiendo de la naturaleza de los colorantes del objeto, y las radiaciones reflejadas por éste, son recibidas por el ojo y son las que determinan los colores que se perciben.

2.1. LA LUZ

La luz es una forma de energía, que se propaga en forma de ondas electromagnéticas que puede ser percibida por el ojo humano. La longitud de onda es una característica importante de la onda electromagnética y varía desde fracciones de 10-16m hasta kilómetros (108). Las ondas electromagnéticas, se propagan en el vacío a una velocidad de $c = 300000$ km/s ($3 \cdot 10^8$ m/s). La velocidad de la luz en el vacío no puede ser superada por la de ningún otro movimiento existente en la naturaleza. En cualquier otro medio, la velocidad de la luz es inferior.

2.1.1. Espectro electromagnético

Una de las características de las ondas electromagnéticas es la longitud de onda. Por esta razón, existen diferentes ondas las cuales se agrupan con diferentes nombres y en diferentes bandas de frecuencia según esta variable, como por ejemplo: rayos gamma, rayos x, rayos ultravioleta, rayos visibles, rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio, como se muestra en la figura 1.

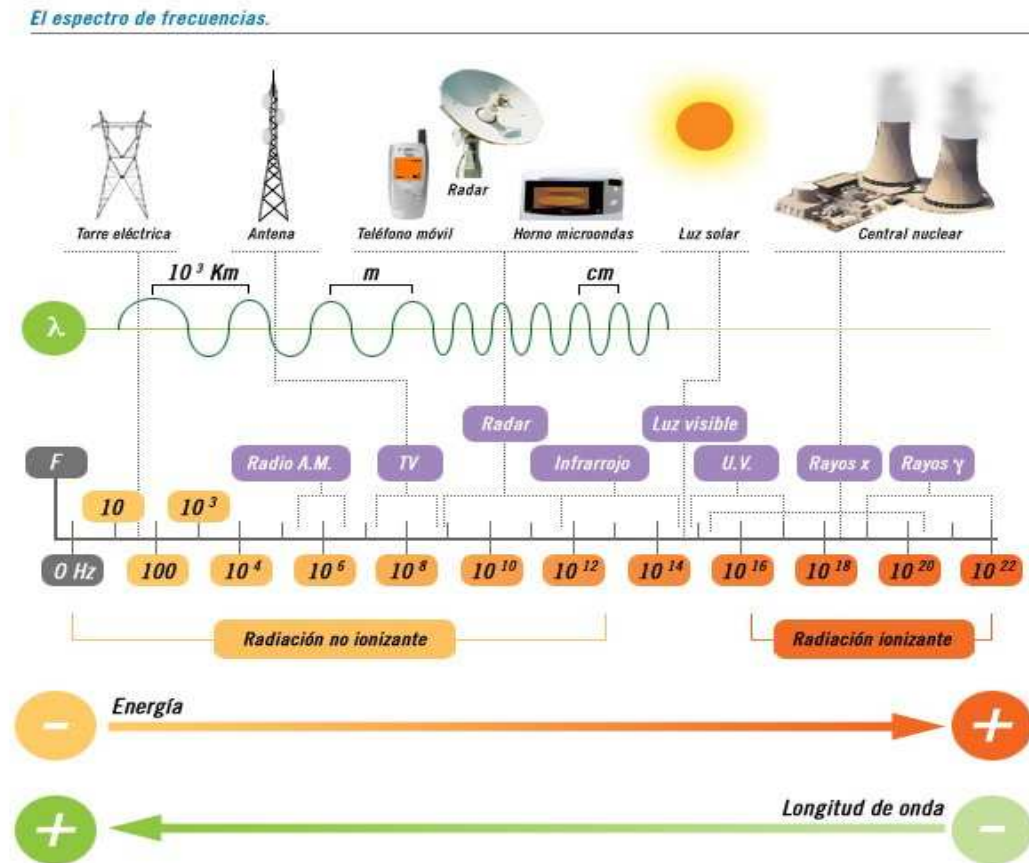


Figura 1: Espectro electromagnético

La energía transportada por estas ondas es proporcional a su frecuencia, de modo que **cuanto mayor es la frecuencia de la onda, mayor es su energía, y menor la longitud de onda**. Por tanto, el espectro electromagnético puede ser expresado igualmente en cualquiera de esos términos. Se relacionan con las siguientes ecuaciones:

$$c = f \lambda \quad (1.1)$$

ó lo que es lo mismo:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.2)$$

Donde

- c = velocidad de la luz en el vacío
- f = frecuencia de la onda
- λ = longitud de onda

Solo una pequeña parte del espectro electromagnético produce sensación de visión. A esta parte del espectro se las denomina **radiaciones visibles** y forman parte del espectro cromático que se detalla a continuación.

2.1.2. Espectro visible

La luz es la parte del espectro electromagnético, que puede ser percibida por el sentido de la visión. Sin luz, no podríamos percibir ni las formas ni los colores de los objetos. La luz que llega a nuestros ojos, es un pequeño conjunto de radiaciones electromagnéticas de longitudes de onda comprendidas entre 380nm y 770nm, lo que representa sólo una mínima fracción de todo el espectro electromagnético.

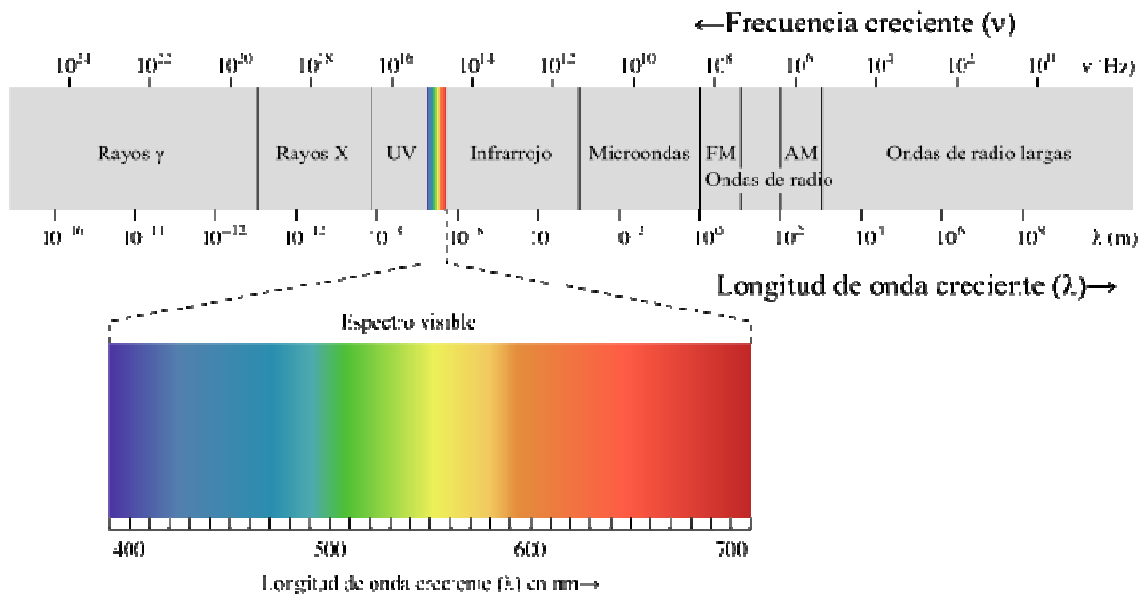
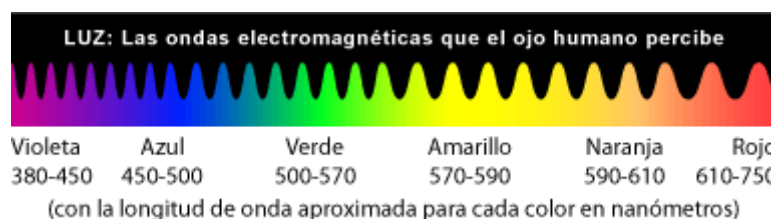


Figura 2: Espectro visible

Dentro del espectro de luz visible, ciertas longitudes de onda nos causan determinadas sensaciones visuales. Así, por ejemplo, las longitudes de onda más cortas se perciben como colores violetas o azulados y las largas, como anaranjados y rojizos como se puede observar en la figura de arriba o de abajo. Sin embargo, es importante entender que el uso de expresiones como "luz azul" es sólo una cuestión de comodidad expresiva que no se contradice con el hecho de que el color sólo existe realmente en nuestra mente.



2.1.3. Interacción entre la luz y los objetos

Las radiaciones de iluminación son modificadas por el objeto mediante procesos físicos tales como: reflexión, refracción, transmisión y absorción.

Las radiaciones electromagnéticas viajan en el vacío a la velocidad de la luz y en línea recta, así pueden ser descritas como rayos de luz. En nuestro medio (el aire de la atmósfera terrestre), los rayos de luz viajan también en línea recta hasta que interaccionan con los átomos o moléculas de ésta y otros objetos. Estas interacciones dan lugar a los fenómenos de reflexión, absorción, transmisión y refracción.

Todas estas interacciones dependen del índice de refracción del material con el que choca la luz. Se denomina **índice de refracción** al cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio cuyo índice se calcula. Se simboliza con la letra n y se trata de un valor adimensional.

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.3)$$

Donde:

- c : la velocidad de la luz en el vacío
- v : velocidad de la luz en el medio en el que nos encontremos (agua, vidrio, etc.).

A continuación, se presentan las diferentes propiedades que puede presentar la luz al alcanzar una superficie:

2.1.3.1. Reflexión

La reflexión es el cambio de dirección de un rayo o de una onda (de luz en este caso), que ocurre en la superficie de separación entre dos medios. La medida de la reflexión es la reflectancia y se define como la relación entre el flujo luminoso reflejado y el flujo luminoso incidente.

Cuando un rayo incide sobre una superficie plana y lisa, y rebota hacia el mismo medio, decimos que se refleja y que cumple las llamadas “leyes de la reflexión”, que son las siguientes:

1. El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado, se encuentran en el mismo plano
2. El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

A este tipo de reflexión se le llama reflexión especular (figura 3.a)

Si por el contrario la superficie en la que incide el rayo es áspera o irregular, los rayos reflejados salen en direcciones aleatorias, lo que se llama reflexión difusa (figura 3.b).

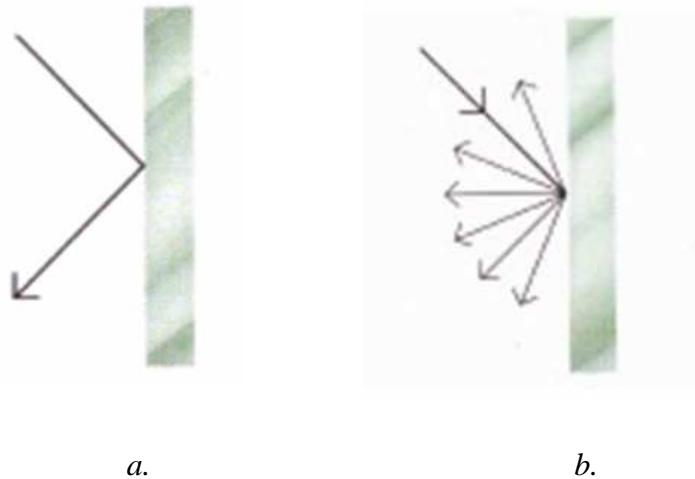


Figura 3: Reflexión especular (a) y difusa (b)

2.1.3.1.1. Difusor perfecto

Un difusor perfecto es aquel que posee una luminancia constante independiente del ángulo de incidencia de luz que lo ilumina. Dicho de otra manera, un difusor perfecto es aquel que no importa de donde se lo mire, que independientemente del ángulo de observación, siempre se lo verá con la misma claridad o luminosidad.

2.1.3.2. Refracción

La refracción, es el cambio de dirección que experimenta una onda (en este caso la luz) al pasar de un medio material a otro. Solo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la separación entre los dos medios y si estos tienen índices de refracción distintos.

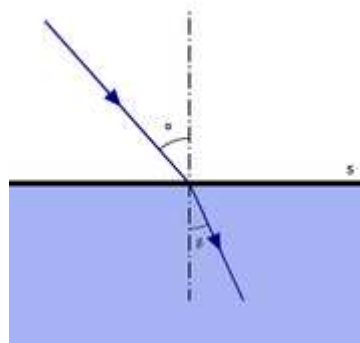
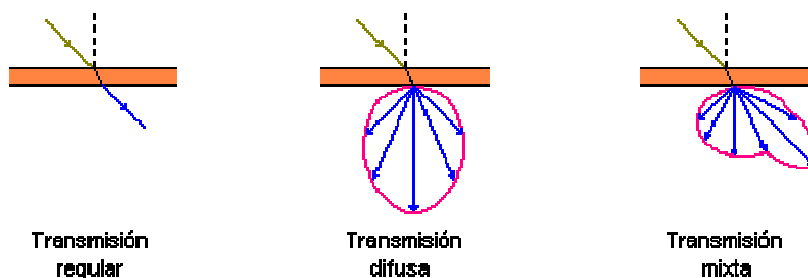


Figura 4: Refracción

2.1.3.3. Transmisión

La transmisión directa o regular de la luz ocurre cuando la luz penetra en cualquier cuerpo sin ser dispersada o difundida por las irregularidades en la superficie. Los cuerpos pueden ser transparentes (como el agua el aire o el vidrio), translúcidos u opacos. Los primeros, permiten el paso de la luz y dejan ver lo que se encuentra detrás de ellos, este tipo de **transmisión** se llama **regular**. La **transmisión difusa** ocurre cuando una cierta cantidad de luz que es dispersada por las irregularidades de la superficie o del cuerpo en cuestión (cuerpos translúcidos). Si por el contrario predomina una dirección sobre las demás, tenemos la transmisión **mixta**, como ocurre en los vidrios orgánicos o en cristales de superficie labrada.



Los cuerpos opacos, son los que no dejan pasar la luz a través de ellos, es decir, impiden el paso de la luz y de la imagen, como por ejemplo: la madera, el metal, etc.

2.1.3.4. Absorción

Cuando la luz blanca o visible interacciona con un objeto, una parte de los colores que la componen son absorbidos por la superficie y el resto son reflejados. Las componentes reflejadas, son las que determinan los colores que percibimos. Si las refleja todas, veremos blanco y si las absorbe todas diremos que el color es negro. Un objeto es rojo porque refleja la luz roja y absorbe las demás componentes de la luz blanca. Si iluminamos el mismo objeto con luz azul lo veremos negro porque el cuerpo absorbe esta componente y no refleja ninguna. Queda claro entonces, que el color con el que se percibe de un objeto depende del tipo de luz que le enviamos y de los colores que este sea capaz de reflejar o transmitir.

Es por esto, que la absorción es un proceso muy ligado al color. Como se puede observar en la figura 5, el tomate lo vemos rojo, porque este absorbe las demás radiaciones que inciden sobre él, exceptuando las longitudes de onda correspondientes a los tonos rojizos (650-770nm), longitudes de onda que salen reflejadas.



Figura 5: Longitud de onda que sale reflejada de un objeto

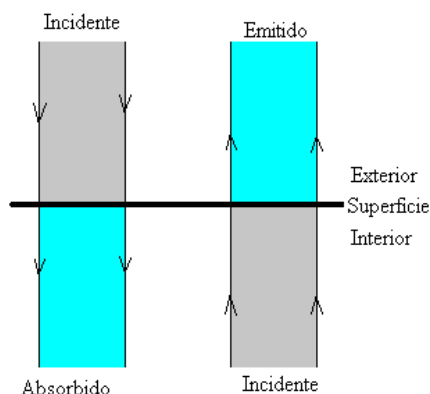
Para poder desarrollar un sistema, es necesario describir y cuantificar las fuentes estándares de luz, el objeto y el observador, estas se detallan a continuación:

2.1.4. Fuentes de luz

Una fuente de luz, funciona como un estímulo físico en la percepción del color. Cada fuente de luz viene caracterizada por la distribución de energía relativa que emite en las diferentes longitudes de onda. Estas fuentes pueden ser naturales (la luz solar), o artificiales, como por ejemplo una lámpara de tungsteno o una lámpara fluorescente.

2.1.4.1. Cuerpo negro

Un cuerpo negro, es un objeto teórico ideal, el cual tiene la capacidad de absorber todas las radiaciones y toda la luz que incide sobre el y de radiar toda la energía incidente que tiene desde el interior. Ninguna radiación se refleja ni traspasa el cuerpo negro.



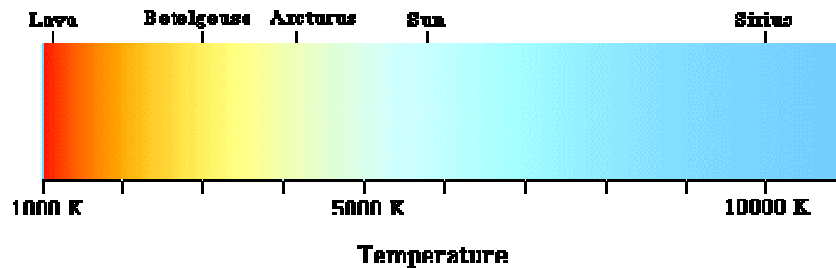
Como ya se ha comentado, todo cuerpo emite energía radiante (en diferentes longitudes de onda) bajo la forma de un espectro continuo. El reparto espectral de esta energía, es decir su color, dependerá del cuerpo considerado, pero es posible imaginar un caso teórico, en el cual el reparto de energía no dependa más de la temperatura, es decir, que no dependa del cuerpo en cuestión. A este caso teórico, se le denomina cuerpo negro.

Un cuerpo negro, se puede llegar a obtener en la práctica; consiste en realizar o practicar una pequeña abertura en una superficie esférica pintada por dentro de color negro. A bajas temperaturas, este agujero es un negro perfecto, pues cualquier radiación que penetre por el, en la practica no sale ya que es absorbida totalmente debido a las múltiples reflexiones y difusiones que se producen en el interior de la esfera.

Cuando hay que describir el contenido de color de una fuente luminosa, se debe definir el contenido de energía espectral de la luz en cada longitud de onda, pero para simplificar esto, se suele hablar del concepto de **temperatura de color**.

La temperatura de color es una escala de relación, entre color y temperatura que describe el color de una fuente de luz en grados kelvin. Mediante esta relación, se describe la calidez o frialdad de una fuente de luz. Solemos relacionar los colores calidos con los amarillos y rojos, y los fríos con los azules, sin embargo, si la temperatura es baja, se

intensifica la cantidad de amarillo y rojo contenida en la luz, pero si la temperatura de color se eleva, habrá mayor número de radiaciones azules. Esto lo podemos observar en la siguiente gráfica, en la que se refleja la temperatura de color de la luz emitida por diferentes estrellas:



2.1.4.2. Iluminantes estándares CIE

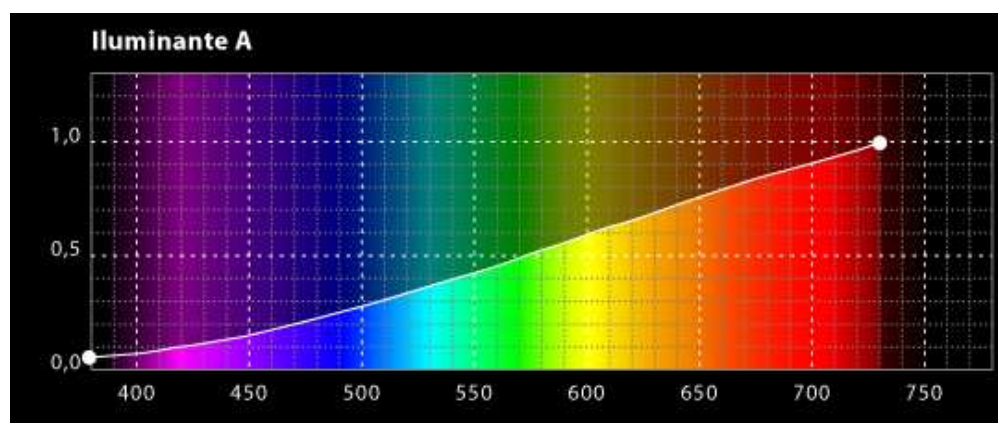
Para poder desarrollar un iluminante, lo que se necesita es un conjunto de números estándar, los cuales pueden o no representar exactamente una fuente de color física. Los iluminantes, son tablas de energía luminosa que emite una fuente, dividida en diferentes longitudes de onda.

Debido a la enorme variedad de fuentes luminosas existentes, la CIE (*Comité internationale de l'Eclairage*), es decir, la Comisión internacional de la iluminación, efectuó un trabajo de estandarización, distinguiendo entre **iluminantes** (definidos por la distribución espectral de su energía) y **fuentes luminosas** (objeto capaz de producir luz en el mundo físico).

En particular, se han definido las distribuciones espectrales energéticas de una serie de iluminantes (algunos de los cuales no existen como fuentes luminosas) para poder usarlos en la descripción del color.

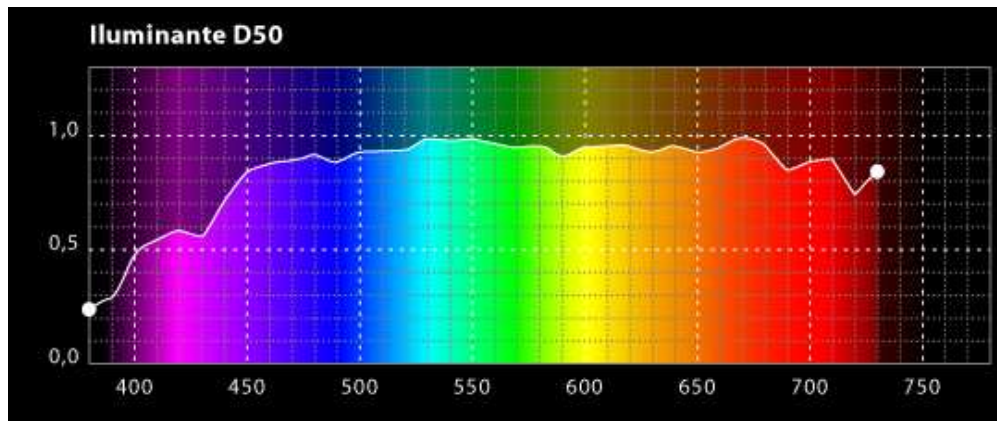
Éstos son los tipos de distribuciones espectrales de algunos iluminantes estándares CIE, todos ellos normalizados con un valor máximo de 0 a 1:

El **iluminante A**, se basa en una de las fuentes más usuales de luz artificial que tenemos, la bombilla incandescente de filamento de tungsteno, que siendo de unos 100W, se corresponde con la de un cuerpo negro calentado a unos 2.854 K.

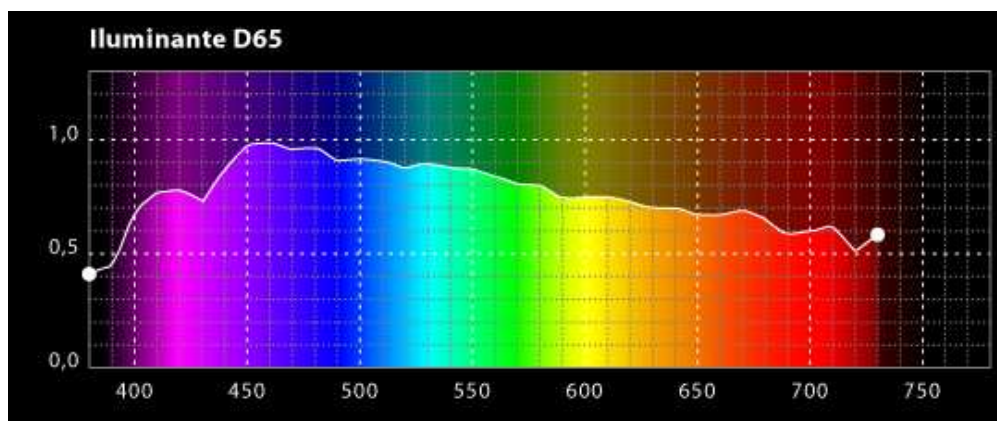


Los nombres que componen la serie de luz de día (daylight), comienzan con la letra D mayúscula y dos cifras que indican la temperatura de color aproximada. Se pueden calcular para cualquier temperatura de color.

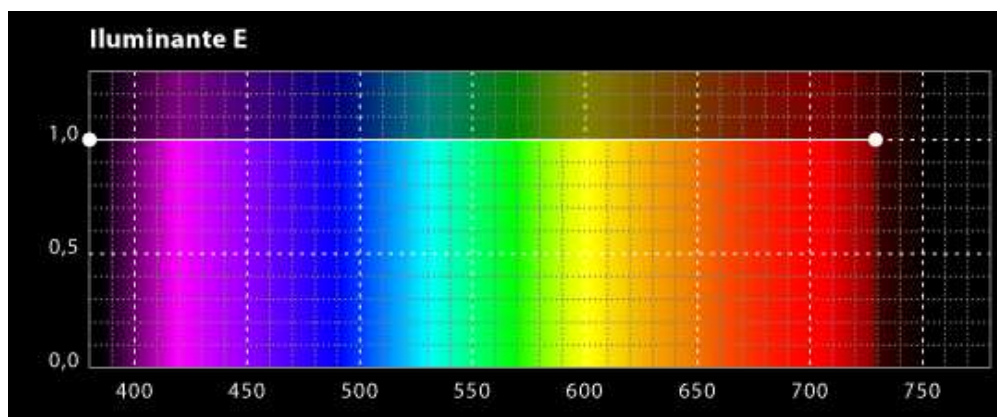
Así, **D50** tiene una temperatura de unos 5.000 K. Este iluminante, pertenece a cuando el sol es de mediodía y su temperatura de color ronda los 5.000 K.



El iluminante que utilizaremos será el **D65**, que se corresponde con la luz que hay en un día soleado, unos 6.500 K, mientras que a la sombra, nuestra luz será más fría, de unos 7.500 K.



El iluminante estándar **E**, es equienergético (tiene la misma potencia en todas las longitudes de onda del espectro luminoso). Este iluminante, es teórico y se suele utilizar para cálculos colorimétricos.



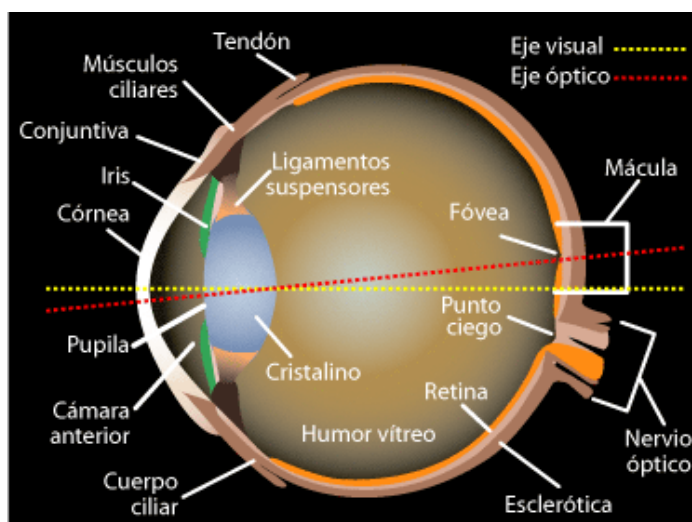
2.2. LA VISIÓN DEL COLOR

El color es algo que hace al objeto más sugestivo y atractivo. El Comité de la Sociedad óptica de América, definió el color como sensación visual que se origina por la estimulación de la retina en el ojo.

El ojo humano, es un órgano sensitivo muy complejo que recibe la luz procedente de los objetos. Su función, es la de comunicar al observador informaciones sobre el mundo que nos rodea. Todos los objetos irradian luz o la reflejan en una región visible del espectro electromagnético. Al ser el ojo sensible a esa parte de espectro, produce las sensaciones del color y de la visión. Esa luz, se enfoca sobre la retina formando una imagen y la transforma en información comprensible para el cerebro.

2.2.1. Fisiología, el ojo humano

El ojo humano, está formado por un grupo **óptico** (cornea, iris, pupila y cristalino), uno **fotorreceptor** (la retina) y otros elementos encargados de la protección, transmisión de información nerviosa, alimentación, etc.



2.2.2. Proceso visual y sus características

La mayor parte de información que recibimos de nuestro entorno, nos llega a través del sentido de la visión. Éste complejo proceso, puede subdividirse en tres etapas, las cuales se comentan a continuación:

1. La óptica; que permite la formación de la imagen en la retina.

La luz entra en el ojo a través de la **cornea** (segmento transparente de radio bastante menor que el globo ocular). La cornea, está continuamente lavada por las lágrimas del parpadeo, y al no tener riego sanguíneo, esta se nutre de la concentración de **humor acuoso** que se renueva constantemente.

Justo detrás de ésta se encuentra el **iris**, una membrana fibrosa que es el verdadero diafragma del sistema visual. Regula la cantidad de luz necesaria para una correcta visión dependiendo de la cantidad de luz recibida.

La **pupila**, es el orificio que posee el iris en el centro. Si se estimula el iris con exceso de luz, ésta se contrae convirtiéndose en un diminuto punto negro, por el contrario, si nos encontramos en lugares oscuros puede dilatarse hasta formar un gran círculo de hasta casi 8mm de diámetro.



La verdadera lente del ojo que hace que los objetos se enfoquen con nitidez en la retina, es el **crystalino**. Está situado justamente detrás de la pupila, es transparente y al igual que la cornea, al no tener riego sanguíneo, está separado del fondo del ojo por el **humor vítreo**, más denso y viscoso que el acuoso.

2. La fotorrecepción; que hace posible el registro de dicha imagen-

La luz recogida por el cristalino está concentrada en la **retina**, la cual se alinea en las paredes internas del globo ocular. Sobre la superficie de la retina hay terminaciones nerviosas llamadas bastones y conos (figura 6).

En cada ojo humano existen cerca de 7 millones de conos y 120 millones de bastones. Dependiendo de las proporciones entre estas distintas células fotosensibles se tiene una mayor sensibilidad a una gama de colores o a otra.

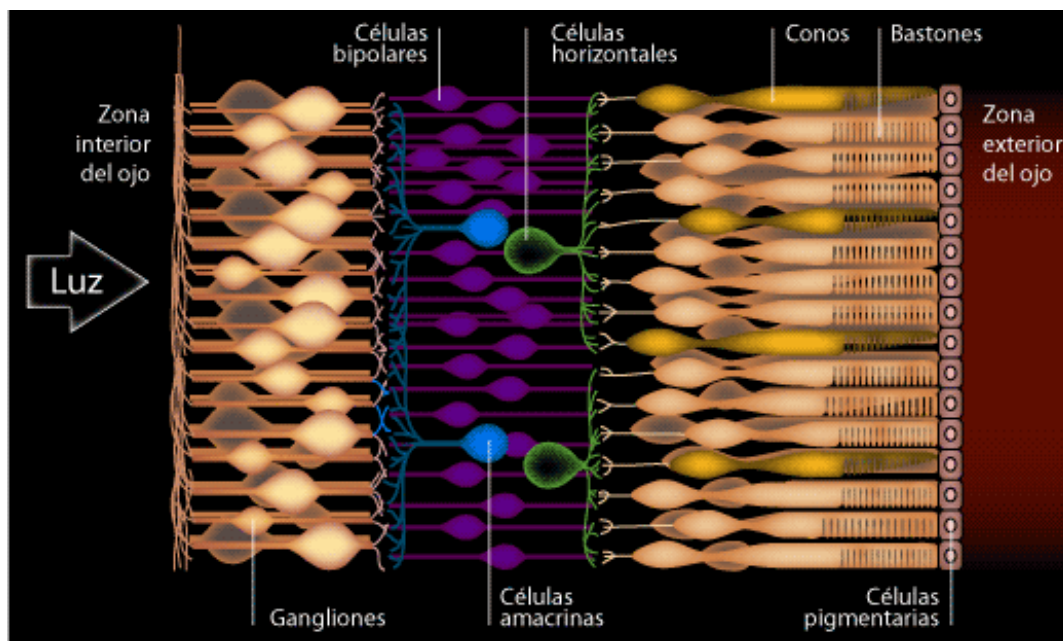


Figura 6: Conos y bastones en la retina

Los conos y bastones actúan de un modo bien diferenciado. Los **bastones** son muy sensibles y se activan cuando existen niveles muy bajos de iluminación. Su máximo de sensibilidad se halla en la zona de los 510nm (en la zona de los verdes). Este tipo de visión, denominada escotópica, sólo utiliza un tipo de sensor, por lo que es monocromática.

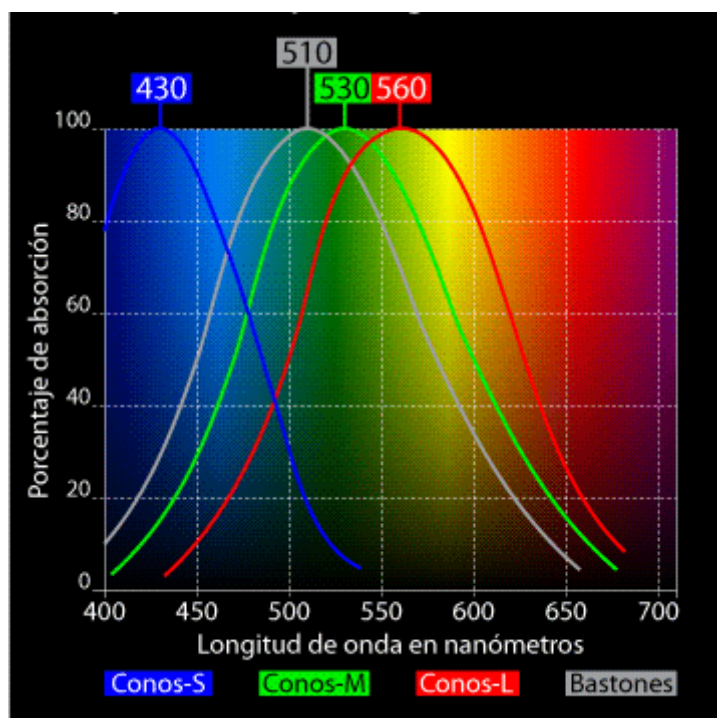


Figura 7: Absorción óptica de los conos y bastones por longitud de onda

En el centro de la retina existe un pequeño hoyo denominado fovea, situado en el eje visual del ojo. Es ahí donde se encuentran situados los **conos**, los bastones en cambio se encuentran en la periferia de la misma.

La visión en color o visión fotópica, está pues basada en la existencia de tres tipos de conos distintos, debido a que cada longitud de onda provoca una respuesta proporcional única en cada tipo de cono, dependiendo de su sensibilidad a longitudes de onda cortas, medias o largas (figura 7). Gracias a los conos podemos distinguir con precisión, pequeñas diferencias en la composición de longitudes de onda de la luz, es decir, en el color.

3. El proceso neural de la imagen para su interpretación.

Los conos y los bastones están conectados a las fibras de los nervios ópticos. Con esto, se podría pensar, que existen cuatro tipos de señales visuales que se transmiten al cerebro, una por cada tipo de célula fotorreceptora (los bastones y los conos S, M y L). En realidad, esto no es así, puesto que la información se codifica sólo en tres tipos de señales denominadas canales.

Esta hipótesis de la existencia de unos canales en el cerebro, es fundamental para poder visualizar el cerebro como un procesador de señales. Un canal, es una ruta para este procesamiento, por eso podemos decir que en lo que respecta al sistema visual humano, la información de los conos se procesa o se codifica mediante tres canales separados.

La existencia de estos canales para el procesamiento de la información del color, ayudan a explicar una de las teorías sobre la visión del color que prevaleció en el siglo XIX: La **teoría tricromática** (figura 8) y la de los procesos opuestos (que veremos más adelante)

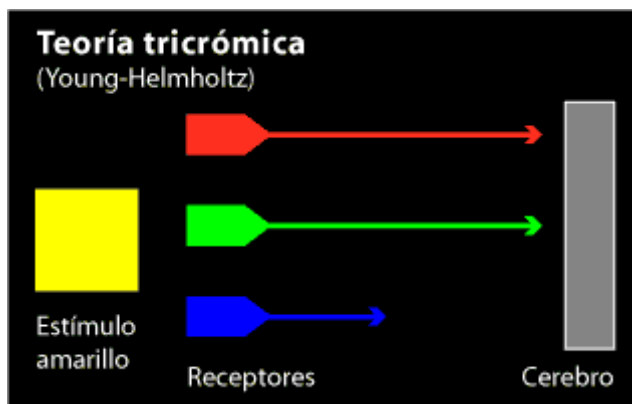


Figura 8: Esquema de la teoría tricromática

Esta teoría fue propuesta en el siglo XIX por Thomas Young (1773-1829) y, posteriormente reafirmada por Helmholtz (1821-1894). Young intuyó la naturaleza retiniana de la trivariancia visual y propuso la existencia de 3 tipos de receptores con sus máximos de sensibilidad en el rojo, en el verde y en el azul. Todas esas experiencias, demostraban que la mayoría de los colores se podían igualar superponiendo tres fuentes de luz separadas conocidas como (colores) primarios, como se verá más adelante, a este proceso se le llama mezcla de color aditiva.

La idea de que el tricromatismo fuese fisiológico en vez de físico no fue acogida con interés hasta que Helmholtz, en 1852, desarrolló más las ideas de Young y resumió la teoría en los siguientes apartados:

- El ojo está provisto de 3 sistemas diferentes de fibras nerviosas sensibles al rojo, al verde y al azul
- Las radiaciones incidentes, excitan estos tres tipos de fibras en grado variable dependiendo de la longitud de onda.
- Cada receptor subministrará información sobre luminancia y cromaticidad.

Según Helmholtz, la estimulación igual y simultánea de los tres fotorreceptores proporcionaría blanco, la del rojo y verde daría amarillo y el azul sería el resultado de una estimulación equilibrada entre el verde y el violeta.

La teoría del color Young - Helmholtz se formó debido a la idea de que en la retina existían tres clases de receptores. Esta teoría, es fundamental para el funcionamiento de muchos procesos de reproducción del color, como la fotografía, la impresión tricromática, o una de las más populares, la televisión.

2.2.3. Anomalías o defectos en la visión del color

Como acabamos de ver en el apartado anterior, una visión normal del color conlleva a que esta sea tricromática, es decir, que nos llegue correctamente la información de los tres conos. Los observadores que tienen una visión normal del color (tricrómatas normales) tienen la capacidad de hacer una buena diferenciación dentro una gran gama de tonos parecidos. Otros en cambio, no son capaces de distinguir tonos o colores que un observador 'normal' vería como diferentes. Estos observadores tienen una visión defectuosa del color, o poseen ceguera de color.

El problema viene cuando falta alguno de los conos, o está defectuoso. Existen tres formas anómalas de ver el color:

1. Monocromatismo:

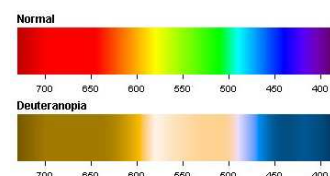
A un observador que no pueda identificar ningún color, se le llama monocrómata, y es totalmente ciego al color, lo único que puede distinguir es entre claros y oscuros.

2. Dicromatismo:

Los observadores que padecen dicromatismo, tienen alguno de los tres conos defectuoso, o les falta alguno. Una persona dicrómatas, puede igualar los estímulos de color utilizando dos de los tres primarios. Existen 3 tipos de dicromatismos:

- **Protanopia:** Se dice que los observadores tienen una ceguera del tipo rojo-verde, debido a que los conos que funcionan correctamente son los **azules (S)** y **verdes (M)**. Colores que se ven como rojo y verde azulado, un observador de estas características, o los ve grisáceos, o también puede que los confunda entre ellos. Estos observadores tienen la sensación de color más brillante, entorno a los 540nm.

- **Deuteranopia:** Poseen los conos responsables del **azul (S)** y del **rojo (L)**. Es la ceguera rojo-verde, con una función de eficiencia luminosa y con la localización del punto más brillante dentro del espectro visible a 560nm. El observador con este defecto, confunde el verde y rojo azulado con el gris o entre ellos.



- **Tritanopia:** Es tipo de dicromatismo menos frecuente, y el que lo padece tiene ceguera para el amarillo-azul. Estos observadores poseen conos **verdes (M)** en combinación con los **rojos (L)**. Este tipo de anomalía es menos frecuente, y el que lo padece, no es capaz de distinguir entre tonos amarillos verdosos y azules con grises, y entre ellos.

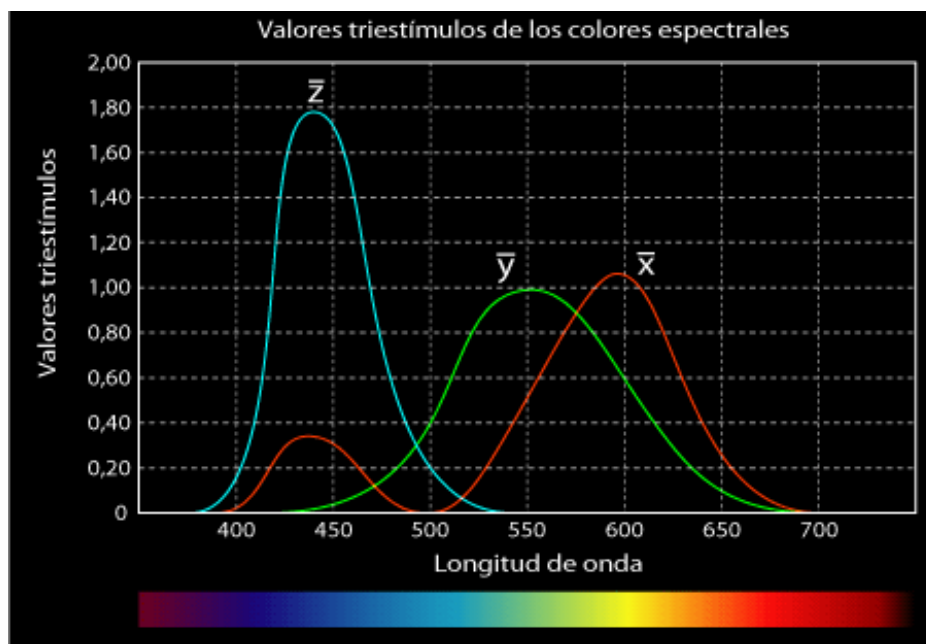
3. Tricromatismo anómalo:

Puede suceder, que aun teniendo los tres tipos de receptores, alguno de ellos defectuoso o con la sensibilidad disminuida (generalmente los del rojo o verde). En este caso, la persona que lo padezca, podrá distinguir los colores, pero dentro de un espectro más restringido, pudiendo identificar como iguales aquellos tonos que para una persona normal resultan bastante parecidos, pero diferentes. Los defectos son parecidos a los del dicromatismo, pero en menor grado. De un 8% de la población masculina que padece algún defecto en la visión del color, alrededor del 5.5% posee este tipo.

2.2.4. Observador estándar CIE

Según la teoría tricromática de la visión en color, un observador puede igualar un estímulo de color mediante una mezcla aditiva (de luces) de color con los tres primarios, con lo que cualquier estímulo cromático se puede especificar mediante la cantidad de los 3 primarios que un observador necesitará para igualar un estímulo.

La modelización del observador estándar, la realizó la CIE a través de unos experimentos en los que se pidió a los sujetos del mismo que establecieran una igualdad entre longitudes de onda monocromáticas con mezclas de los tres primarios aditivos. De hecho, el observador estándar es una tabla en la que se indica cuánto de cada primario necesita un observador promedio para igualar cada longitud de onda.

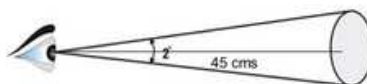


En el gráfico superior se ven las funciones de correspondencia o igualación de colores para los primarios CIE XYZ. Esas son literalmente las cantidades de los tres primarios que un observador promedio necesitará para igualar una unidad de luz en cada longitud de onda.

Tipos de observador:

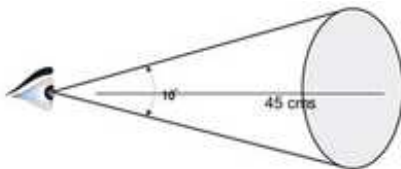
- El observador de 2°:

Durante la realización de estos experimentos, los científicos se preguntaron cómo de grande debería ser el campo de observación. En 1931 la CIE sugirió que el área activada por los estímulos debía ser la obtenida por una proyección de 2° de un ángulo sólido a una distancia de 45cm de la pupila (que equivale aproximadamente a observar una moneda de 20 céntimos de euro a una distancia de 45cm). Estos datos fueron los utilizados para el observador estándar CIE1931 de 2°.

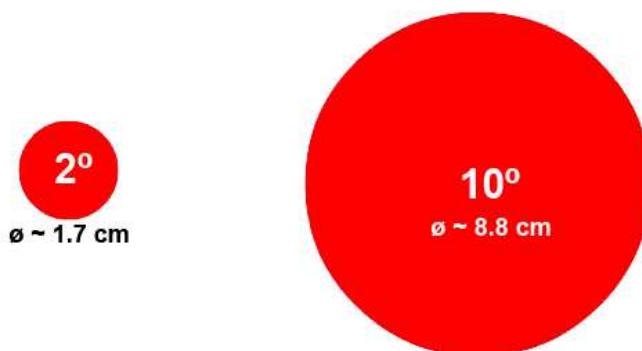


- El observador de 10°:

Los datos del observador de 2°, se prepararon utilizando una región de la fovea del ojo humano que en la práctica, para la apreciación visual del color, se utilizan áreas mayores de la superficie de la retina. Por esto, la CIE definió en 1964 un segundo conjunto de funciones de observador basado en experimentos de correspondencia del color con un ángulo visual de 10° (lo que equivale aproximadamente a observar un CD de los de diámetro pequeño a una distancia de 45cm).



A continuación se representan los campos visuales de los dos observadores:



Comparación entre los campos visuales del observador de 2° y el observador de 10°

2.3. ESPACIOS DE COLOR:

En la práctica, lo más común es describir el color en términos de rojo, verde, o amarillo verdoso, etc. Pero esto no es suficiente para comunicar detalles completos sobre el color; como por ejemplo, al decir amarillo verdoso, no se especifica nada acerca de ¿cuánto de verde?, ¿cuánto de amarillo?, por lo tanto, debe de existir algún método para describir el color con una buena precisión, de modo que pueda haber una correlación con la sensación del color.

Los métodos ideados para describir cuantitativamente el color, reciben el nombre de **sistemas de ordenación del color** o **espacios de color**. A continuación, se presentan diferentes sistemas de ordenación de color, que estarán clasificados en dos grupos:

1. → Sistemas de descripción del color mediante números matemáticos
2. → Sistemas de ordenación del color que están basados en atlas de colores

2.3.1. Sistemas de ordenación del color que describen el color mediante números matemáticos

En estos sistemas las descripciones del color están basadas en la medición espectral de la muestra. Sistemas como el CIEXY, CIELuv, CIEL*a*b*, CIELCh_{ab} y otros se clasifican en este apartado. Estos sistemas de ordenación de color se utilizan en las medidas instrumentales del color.

2.3.1.1. Sistema CIE, valores triestímulo:

Cómo se ha comentado antes, la percepción del color necesita una **fente**, un **objeto**, y un **observador**. Con el sistema CIE 1931 se introdujeron métodos para caracterizar las fuentes de luz (o iluminantes), las superficies y el funcionamiento del sistema visual humano, cuyo comportamiento se midió mediante funciones de correspondencia de color (conocido también como "observador estándar CIE").

En 1931, la CIE desarrolló un sistema para especificar los estímulos cromáticos basándose en valores triestímulos de tres primarios imaginarios. La base de este sistema fue el llamado observador estándar CIE 1931.

Los **valores triestímulos** son las cantidades necesarias de los tres primarios que especifican un estímulo de color. Estos valores de CIE 1931 se llaman **X**, **Y** y **Z**, y únicamente definen el color en números. Aunque describen con precisión el color, no dan ninguna información sobre su aspecto.

Si se conoce el espectro de reflectancia de una muestra de color, los valores triestímulos se podrían calcular como se muestra a continuación. El espectro de reflectancia se puede medir usando un espectrofotómetro.

Cálculo de los triestímulos

Los valores triestímulos X, Y, y Z se pueden calcular integrando los valores de reflectancia $R(\lambda)$, las distribuciones de la energía espectral relativa del iluminante $E(\lambda)$ y las funciones de observadores estándar $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$. La integración se logra, aproximando con sumatorios, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{1}{K} \sum R(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \\
 Y &= \frac{1}{K} \sum R(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \\
 Z &= \frac{1}{K} \sum R(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \\
 K &= \sum E(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda)
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

En los cálculos, el factor de reflectancia varía de 0 a 1. Por convenio, la Y se sitúa en 100 para un blanco ideal que refleja toda la energía incidente en él. Es por esto que se introduce el factor de normalización $1/K$. En ese caso, el valor de Y es el factor (perceptual) de reflexión, que a su vez se corresponde con el atributo perceptual de la luminosidad.

2.3.1.2. Espacio xy (Coordenadas de cromaticidad)

El diagrama de cromaticidad, como su nombre bien indica, nos indica la croma, pero no la luminosidad. La luminosidad, viene expresada por la reflectancia luminosa, que está representada por el valor triestímulo Y, los otros dos valores del triestímulo X y Z no se corresponden con ningún atributo perceptual. Sin embargo, algunos atributos perceptuales del color se corresponden con magnitudes relativas de los valores triestímulo. Estas magnitudes se calculan con las siguientes fórmulas, que definen las coordenadas de cromaticidad de un valor, cuyos valores de triestímulo son X, Y y Z:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (1.5)$$

Por ejemplo, si $X=8$, $Y=48$, $Z=24$, entonces $X+Y+Z = 80$ y $x = 8/80 = 0.1$; $y = 48/80 = 0.6$; $z = 24/80 = 0.3$. Esto significa que este color en concreto contiene un 10% de x, un 60% de Y, y un 30% de Z. Como x se corresponde de modo aproximado al rojo, y al verde y z al azul, se puede pensar que se trata de un verde azulado de un factor de luminancia Y a mitad del blanco y el negro.

Como $x + y + z = 1$, se deduce que con dos de los valores colorimétricos es suficiente; los dos utilizados son x e y . Con estos dos valores es posible construir un diagrama bidimensional como el siguiente.

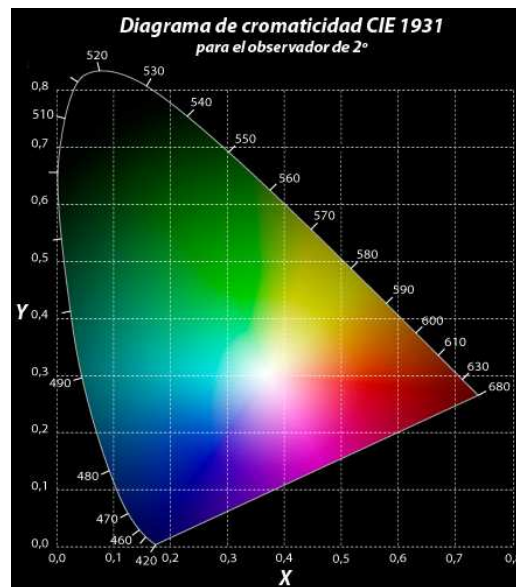


Diagrama de cromaticidad CIE XY 1931

Los extremos se conectan para completar la figura, formando lo que se denomina el diagrama de cromaticidad el cual contiene todos los colores que son distinguibles para la media del ojo humano. Todos los colores que se encuentren fuera del diagrama, no podrán producirse.

En la izquierda de la curva, se muestran los colores de longitud de onda corta, desde el violeta en la parte inferior, pasando por el azul, verde y verde azulado en la parte superior. En la parte derecha en cambio, se encuentran los tonos amarillos verdosos, amarillos y rojos que van de la parte superior a la inferior.

La **superficie** cromática es abarcada por una curva sobre la cual están situados los lugares de color de los colores espectrales que están **completamente saturados**. En el interior de esa superficie se encuentra el punto con menor saturación, es decir, el blanco o el punto acromático.

Todos los grados de saturación de un color se podrán encontrar ahora sobre la recta entre el punto acromático y el lugar de color correspondiente. Todas las mezclas de dos colores se encuentran también sobre una recta entre los lugares de color respectivos. Los colores complementarios en cambio, se encuentran frente a frente en el modelo CIE.

El sistema CIE, no es un sistema que esté espaciado visualmente por igual, por eso, se realizaron intentos para transformar el sistema CIE y poder obtener así un sistema que estuviera espaciado de una forma visualmente más por igual. Para conseguir esto, se propusieron transformaciones lineales, así como no-lineales. La transformación lineal, mantiene las características de la mezcla aditiva de color, mientras que las no lineales no.

A continuación se describirán las transformaciones del sistema CIE que más se utilizan en la práctica:

2.3.1.3. Espacio CIELuv:

Muchos autores propusieron varias **transformaciones lineales** de las coordenadas cromáticas CIE para mejorar el espaciamiento visual del mismo. La transformación de McAdam fue la que recibió más atención. Las coordenadas resultantes de McAdam se denominan coordenadas u , v . La conversión de valores triestímulo CIE a coordenadas u , y v se realizó de la siguiente manera:

$$u = \frac{4x}{x + 15y + 3z} \quad v = \frac{6y}{x + 15y + 3z} \quad (1.6)$$

De este modo, el diagrama cromático, es reemplazado por el u , y v . Una de las mayores diferencias, radica en que el punto blanco que corresponde al iluminante C CIE y no permanece en el centro del diagrama. También ocurría que el lugar del tono constante Munsell no era una línea recta y la croma no eran círculos completos. Para poder mejorar el espaciamiento de Munsell, se propuso cambiar la coordenada v en un 50%. Estas nuevas coordenadas son llamadas u' y v' .

$$u' = u = \frac{4x}{x + 15y + 3z} \quad v' = 1.5v = \frac{9y}{x + 15y + 3z} \quad (1.7)$$

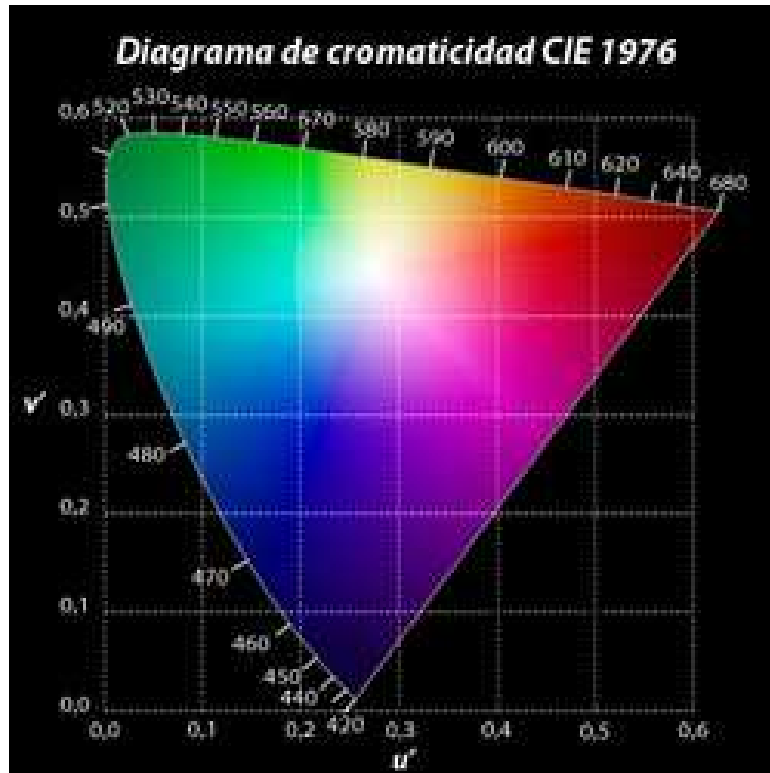


Figura 9: Diagrama de cromaticidad CIE 1976

2.3.1.4. Espacio CIEL*a*b*

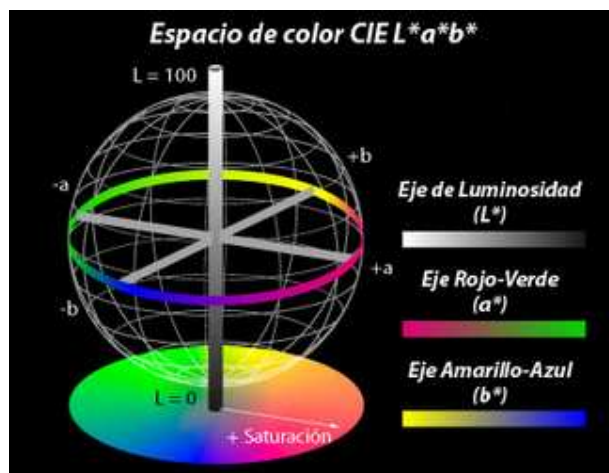
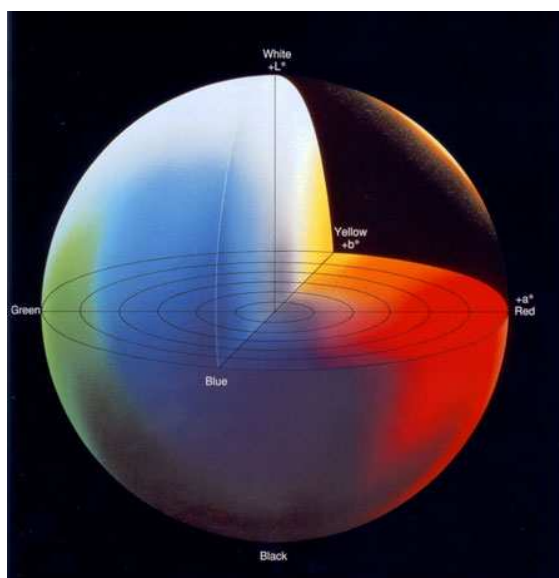
En 1976, la CIR propuso el espacio de color CIEL*a*b*, como una aproximación a un espacio de color uniforme.

El espacio de color CIEL*a*b* es una transformación matemática del espacio XYZ en el cual se fija un blanco de referencia y cuyos valores triestímulo para el observador e iluminante elegidos son: X_n , Y_n , Z_n (cuyos valores aparecerán en el método operativo).

L^* , a^* y b^* serán las cantidades representadas en las siguientes formulas:

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\
 a^* &= 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \\
 b^* &= 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right]
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

los cocientes de X/X_n , Y/Y_n y Z/Z_n son todos superiores a 0,008856 (cuando alguno de ellos es menor a esa cifra, se usa un conjunto de ecuaciones levemente distinto).



Los tres ejes del sistema CIE $L^*a^*b^*$ se indican con los nombres L^* , a^* y b^* , los cuales representan, respectivamente la luminosidad (lightness), tonalidad de rojo a verde (redness-greenness) y tonalidad de amarillo a azul (yellowness-blueness).

Los dos últimos ejes están inspirados en la **teoría de los colores oponentes**, que dice que el oponente de un color, se obtiene mediante la contraposición de un primario (RGB) con un color secundario (CMY) formado por los otros dos primarios. Así por regla general (en el sistema RGB), el complementario del color verde es el color rojo y del azul es el amarillo.

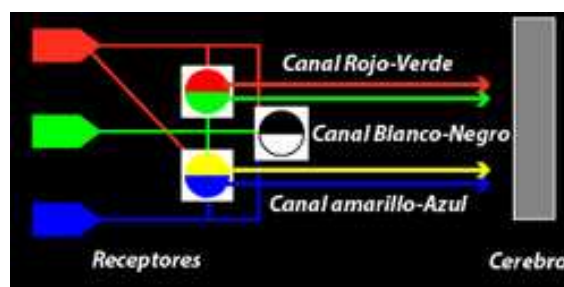


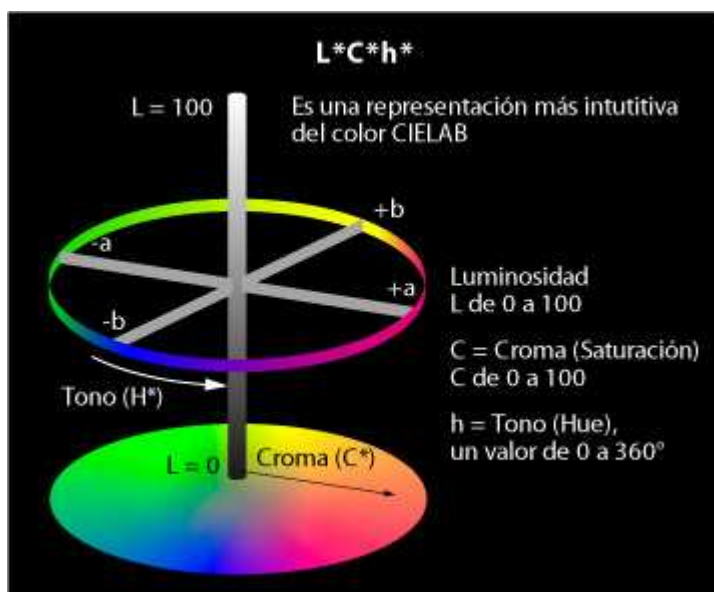
Figura 10: teoría de los colores oponentes

La teoría Young–Helmholtz no es capaz de explicar por qué la mezcla de luz roja y verde conduce a la sensación de amarillo o por qué la mezcla de amarillo más azul proporciona blanco (donde hay una cancelación de los atributos cromáticos). Hering se interesó por estos fenómenos y de 1872 a 1874 pretendió resolver las dificultades de la teoría tricromática de Helmholtz.

Para ello, propuso la existencia de tres procesos oponentes generados en algún lugar de la ruta visual: el proceso claro-oscuro, otro rojo-verde y otro amarillo-azul. Ello explicaría por qué no es posible experimentar simultáneamente las sensaciones rojo-verde o amarillo-azul. Según esta teoría, existirían 3 tipos de discromatopsias (daltonismos): la ceguera rojo-verde, la ceguera amarillo-azul y la ceguera total cromática cuando se suprimen los dos procesos oponentes.

2.3.1.5. Espacio CIE L* C_hab Polar

CIE L*C_hab es una representación polar del sistema rectangular CIE L*a*b*. Se comunica el color en términos de luminosidad, saturación y tono.

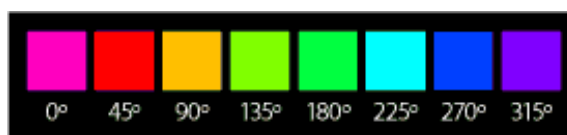


$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (1.9)$$

$$h_{ab} = \arctan \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (1.10)$$

Los valores de C y h_{ab} se corresponden respectivamente con la croma y el tono o matiz. El valor de h es el ángulo del tono, y se expresa en grados que van de 0° (incluido) a 360° (excluido). Si se calcula en radianes, hay que convertirlo a grados multiplicándolo por $180/\pi$, en nuestro caso, los valores obtenidos que el espectrofotómetro de Konika-Minolta serán valores expresados en grados.

Los tonos correspondientes a los distintos ángulos de matiz o tono son aproximadamente los siguientes:



2.3.2. Sistemas de ordenación del color que están basados en atlas de colores

El sistema Munsell y el Pantone, son sistemas que se representan por su atlas de color. El atlas contiene varios cartoncitos de color colocados en una configuración determinada y son identificados mediante nombre o mediante números determinados.

2.3.2.1. Sistema Munsell

El artista Albert Munsell (1858-1918), propuso un sistema de ordenación del color que describía los colores por medio de los criterios del tono, la saturación y la luminosidad, generando un atlas de colores dentro de una matriz tridimensional. El sistema está basado

en la recogida de muestras, las cuales están preparadas para representar un intervalo igual de percepción visual entre muestras contiguas.

Se denomina **luminosidad**, a la reflectancia del color propio.



Variaciones en la luminosidad, con el tono y la saturación constantes

El tinte o **tono**, es el color propiamente dicho.



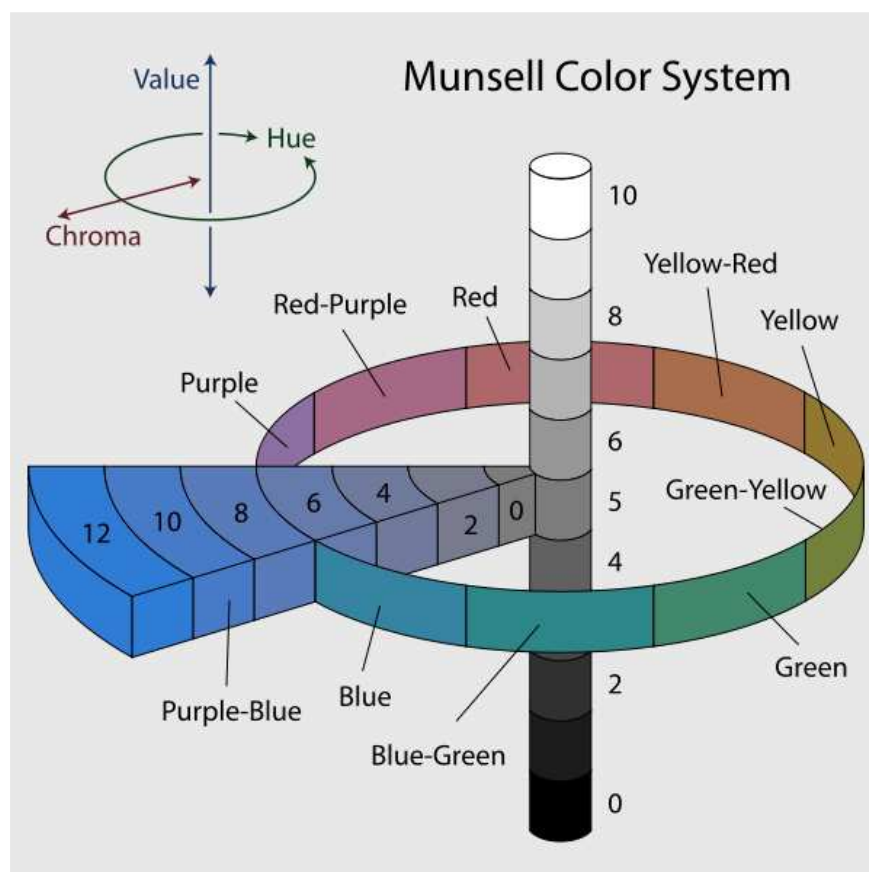
Variaciones en el tono, con la luminosidad y la saturación constantes

El concepto **saturación** o croma, nos identifica la variación que existe desde un color puro hasta el gris acromático.



Variaciones en la saturación, con la luminosidad y el tono constantes

El sistema de color de Munsell representa el tono, la luminosidad y la saturación de la siguiente manera.

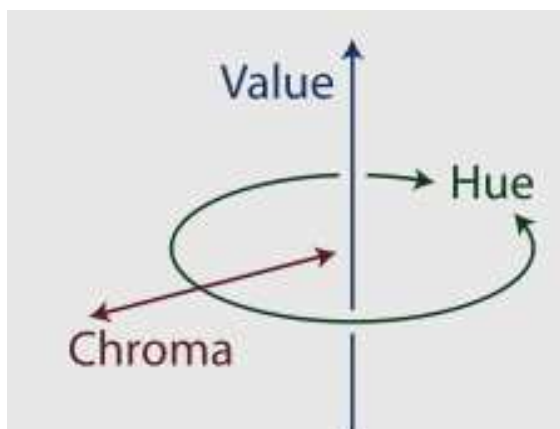


El tono de Munsell clasifica los colores por el nombre. El **tono de Munsell** consta de 5 tonos fundamentales: rojo, amarillo, verde, azul y púrpura, y 5 tonos intermedios tales como el amarillo-rojo, verde-amarillo, azul-verde, púrpura-azul y rojo-púrpura. Cada uno de esos 10 tonos, está dividido en 10 partes o en cualquier cantidad fraccionaria como, 2.5, 5, 7.5, 10.0. Así, los tonos Munsell forman un círculo R, YR, Y, GY, G, BG, B, PB, P y RP como se muestra en la figura de arriba. El centro del círculo del tono es un polo gris, que varía de color.

La dimensión de luminosidad, se denomina **valor de Munsell**. Este valor de Munsell. Varía desde el negro (abajo del todo y con valor 0), hasta el blanco (arriba y con valor 10).

Desde el polo gris, los colores aumentan en saturación cuando el radio del círculo del tono aumenta, por lo que los colores más saturados se producen en la periferia. A esta escala de saturación, se le denomina **croma de Munsell**. El croma de Munsell tiene el valor 0 para el neutro y aumenta de 2 en 2. Aumenta hasta 14 para las pinturas rojas y amarillas no fluorescentes. En el caso de la figura de arriba, aparece el color Azul-púrpura, que llega hasta 12.

Puesto que en este sistema el color viene calificado por el tono Munsell, el valor Munsell y el croma de Munsell, las coordenadas Munsell son mencionadas como TONO-VALOR / CROMA. Como por ejemplo: 2.5 R-5 / 6 representa el tono rojo 2.5 correspondiente al valor 5 y croma 6.



Visualización de los tres atributos del sistema Munsell

La colección de las muestras de Munsell están disponibles en forma de libro (*Munsell 1929*). Cada página representa un tono (hue) constante, con cartoncitos de colores ordenados en filas y columnas. La claridad o el valor de Munsell, varía de arriba abajo indicando los colores acromáticos que oscilan desde el blanco al negro; la croma se sitúa de izquierda a derecha, ordenados en filas y los colores con croma constante están colocados en columnas.



2.3.2.2. Sistema Pantone:

Pantone Inc. es una empresa norteamericana creadora de un estándar para la comunicación y reproducción de colores en las artes gráficas.

Su sistema de definición cromática es el más reconocido y utilizado, por lo que su nombre completo es Pantone Matching System. Se basa en la edición de una serie de catálogos que suministran una codificación estandarizada mediante un número de referencia y un color específico. A este modo de color, a diferencia de CMYK y RGB se le llama color directo.

El sistema se basa en una paleta o gama de colores (llamadas Guías Pantone), de manera que muchas veces es posible obtener otros colores por mezclas de tintas predeterminadas que proporciona el fabricante.

Es un sistema muy empleado en la producción de pinturas de color por mezcla de tintes. Estas guías consisten en un gran número de pequeñas tarjetas (15×5 cm. aproximadamente) de cartón, sobre las que se han impreso por un lado muestras de color. Están organizadas todas en un cuaderno de pequeñas dimensiones. Por ejemplo, una página concreta podría incluir una gama de amarillos variando en luminosidad del más claro al más oscuro.

La mayor ventaja de este sistema es que cada una de las muestras está numerada y una vez seleccionada es posible recrear el color de manera exacta.

2.3.3. Ecuaciones de diferencia de Color CIE

Cuando queremos saber si dos muestras de color son iguales, basta con mirarlas bajo una correcta iluminación y posición, debido a que el ojo humano puede decir si los colores de dos muestras están igualados o no. Lo que pasa es que cuando existe una mínima diferencia perceptible, es difícil para el ojo y el cerebro calcular la magnitud de dicha diferencia. Por esto mismo, es necesario disponer de unas cartas de tolerancia que están preparadas tanto para el uso de instrumentos, como para cualquier tipo de lote en la producción de una empresa.

Una de las primeras maneras de determinar la diferencia de color, fue a partir de las diferencias de los valores triestímulo, mediante la fórmula:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad (1.11)$$

Donde la ΔE significa, **diferencia de color**, y la letra E viene del alemán ‘empfindung’ que significa sensación.

Cualquier cambio en la posición de un punto en el diagrama cromático, dará una diferencia de color perceptible. Pero como sabemos, la CIE (que desde 1936 definió las coordenadas de color para describir el color con números), no está reconocido como un sistema espaciado visualmente por igual, con lo que un cambio de igual magnitud en

cualquier punto del diagrama, no representará perceptualmente la misma diferencia de color.

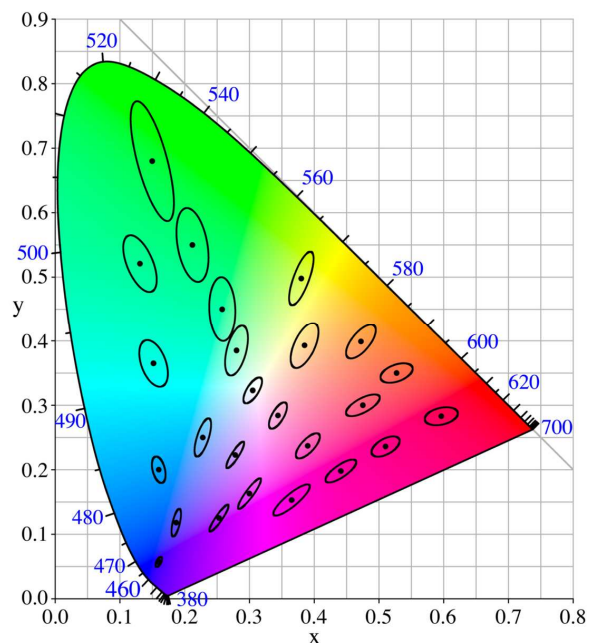
Las elipses de McAdam son unas regiones en el diagrama cromático, las cuales contienen colores que son indistinguibles para la visión humana. Debido a que el ojo, no es sensible por igual a todos los colores del espectro visible, se realizaron experimentos para decidir cuales serían las tolerancias (elipses de McAdam) para las diversas cromaticidades.

Estos experimentos, consistían en hacer mirar a los observadores, dos colores diferentes de luminancia constante. Uno de los colores era fijo, y el otro variable, para que el observador pudiera ir moviéndolo hasta ajustar 'perfectamente' al color fijo. Lo decimos entre comillas, porque el ojo humano tiene una precisión limitada. De todos modos MacAdam descubrió que todos los resultados de los observadores se podían ajustar a una elipse. El experimento se realizó en 25 puntos del diagrama, y se confirmó que el tamaño y la orientación de las elipses variaban en función del test realizado.

Esto se puede observar en la siguiente figura de la derecha:

Los resultados de los experimentos, confirmaron que lo mejor sería usar una medida métrica que definiera la distancia entre dos puntos del espacio. A parte de esto, la no-uniformidad del espacio xy, llevo a que las ecuaciones de diferencia de color, se realizarán con los espacios CIEL*a*b* o CIELuv, y eso que ni siquiera estos dos espacios proporcionan una correlación exacta con la valoración visual, ni reproducen las elipses de MacAdam.

La diferencia de color total en el espacio CIEL*a*b* viene representado pues por ΔE^* , la **diferencia cromática o diferencia de percepción** entre 2 estímulos (dos muestras de color). La llamada distancia euclídea existente entre 2 puntos en un espacio tridimensional. Por lo que esta distancia, es la distancia "ordinaria" entre dos puntos de un espacio euclídeo que se deduce a partir del teorema de Pitágoras:



$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1.12)$$

ΔE^* significa literalmente, diferencia de sensación y el asterisco se usa para denotar que estas diferencias han sido calculadas a partir del sistema CIE L*a*b*.

El ojo humano es capaz de **discriminar dos colores cuando $\Delta E^* > 3$** , aunque este resultado, puede variar en función de la zona cromática en la que estamos evaluando un color u otro.

Más adelante se observarán los resultados obtenidos tras haber calculado esta distancia con las coordenadas $L^*a^*b^*$.

Grado	Nivel de diferencia
$\Delta E^* < 1$	Imperceptible
$\Delta E^* < 2$	Mínima
$\Delta E^* < 3$	Aceptable
$\Delta E^* < 5$	Casi inaceptable
$\Delta E^* = 5$	Inaceptable

También se han utilizado otras ecuaciones para el cálculo las diferencias entre tono Pantone y muestra (test que se detalla más adelante), de la luminosidad (ΔL^*), croma (ΔC) y tono angular (Δh_{ab}), debido a que estas diferencias son más cualitativas que la diferencia cromática.

2.4. INSTRUMENTOS PARA LA MEDIDA DEL COLOR

Los instrumentos colorimétricos, están diseñados para proporcionar automáticamente valores triestímulo y las coordenadas de color de un objeto dado sin usar el ojo humano. Para ello, se requieren los valores de reflectancia junto con los datos del observador estándar CIE y los iluminantes que permiten describir el color en términos objetivos. Un instrumento de color, consta de dos partes: el sensor óptico y el procesador de señales

El sensor óptico puede ser un espectrofotómetro o un colorímetro triestímulo. En este proyecto se ha usado un espectrofotómetro de reflectancia, por eso se hará hincapié en este tipo de instrumentos para la medición del color.

- *ESPECTROFOTÓMETRO DE REFLECTANCIA*

El espectrofotómetro es un aparato diseñado para medir el espectro de transmitancia o reflectancia de un objeto. El objetivo de estos aparatos es el de comparar la radiación reflejada para cada longitud de onda a la salida del objeto con la luz incidente.

El funcionamiento de un espectrofotómetro consiste básicamente en iluminar una muestra con luz blanca y en calcular la cantidad de luz que refleja dicha muestra en una serie de intervalos de longitudes de onda. Generalmente, los datos se suelen recoger en 39 intervalos de longitudes de onda (de 360nm, a 740nm).

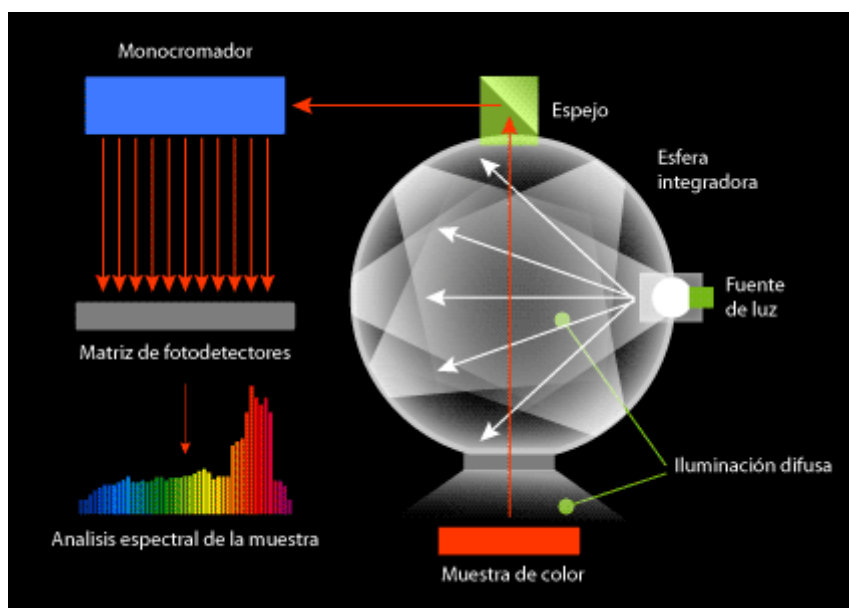


Figura 11: Espectrofotómetro de reflectancia

Lo primero que hay que hacer, es calibrar el aparato con una muestra blanca cuya reflectancia en cada segmento de longitudes de onda se conoce en comparación con una superficie de reflexión difusa perfecta.

Al iluminar la muestra con la fuente de luz, la energía radiante emitida pasará a través del sistema óptico que conecta la fuente con un monocromador, que es el que se encarga de fraccionar la luz en distintos intervalos de longitud de onda. Un detector selectivo recoge y lee la energía de cada una de esas longitudes proporcionando los valores de reflectancia de la muestra analizada en el espectro visible.

La reflectancia de una muestra se expresa entre 0 y 1 ó como porcentaje entre 0 y 100. Es importante darse cuenta de que los valores de reflectancia obtenidos son valores relativos y que para muestras no fluorescentes, son independientes de la calidad y cantidad de luz usada para iluminar la muestra. De este modo, aunque los factores de reflectancia se midan usando una fuente de luz concreta, se pueden calcular los valores colorimétricos para cualquier iluminante conocido.

Como ya se ha comentado, con la función del observador estándar CIE, la distribución relativa de energía espectral de un iluminante y con el espectro de reflectancia de una muestra, se pueden calcular los valores triestímulos CIE XYZ.

- **COLORÍMETRO DE FILTROS TRIESTÍMULO**

Un colorímetro triestímulo, es un instrumento para medir el color con un diseño óptico simple y una moderna tecnología electrónica. Un colorímetro puede ser considerado como una imitación directa del mecanismo de percepción del sistema visual humano ya que consta de una fuente, tres filtros de banda ancha pertenecientes al rojo, verde y azul, y un detector.

El principal problema de estos instrumentos, es precisamente la obtención de los filtros triestímulos, es decir, el ajuste de tres fotocélulas, de forma que su respuesta sea

proporcional a lo largo de todo el espectro visible a los coeficientes de distribución $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, y a $z(\lambda)$, o a alguna combinación lineal de estos.

Si comparamos los dos instrumentos, es obvio que ambos son capaces de determinar el color de una muestra. Sin embargo, es muy normal que al medir la misma muestra con ambos aparatos los resultados sean distintos. Los valores recogidos con el espectrofotómetro, suelen ser más fiables debido a que lo que determina, son los valores de transmitancia o la reflectancia de la muestra.

2.5. EL COLOR COMO FENOMENO SENSORIAL

El color como otras sensaciones que percibimos a través de los sentidos está sometido a criterios de análisis subjetivos. Depende de las preferencias personales, de la relación con otros colores y formas dentro del campo visual (el contraste, la extensión que ocupa, la iluminación recibida, la armonía con el ambiente...), el estado de ánimo y de salud, etc.

Tradicionalmente distinguimos entre colores fríos y cálidos. Los primeros son los violetas, azules y verdes oscuros. Dan la impresión de frescor, tristeza, recogimiento y reducción del espacio. Por contra, los segundos, amarillos, naranjas, rojos y verdes claros, producen sensaciones de alegría, ambiente estimulante y acogedor y de amplitud de espacio.

El significado y el simbolismo del color ha sido objeto de estudio durante mucho tiempo. Tom Clarke y Alan Costall del departamento de psicología de la Universidad de Portsmouth (Reino Unido), realizaron un estudio a un grupo de 16 estudiantes entre 18 y 21 años acerca de las connotaciones emocionales de los colores [1].

El estudio consta de 2 partes, en las que los participantes dieron su opinión a cerca de 11 colores; rojo, naranja, amarillo, verde, azul, morado, negro, blanco, rosa, marrón y gris. En la primera parte, dan su opinión acerca de lo que les hace sentir cada color, o a que les recuerda, todo esto imaginándose ellos mismos el color. La segunda parte en cambio, es una entrevista individual para charlar un poco más con los participantes y poder ver realmente como sienten y como son.

Los resultados obtenidos, fueron los siguientes:

Sensaciones asociadas a los colores.	
Blanco	Frialdad, higiene, neutralidad.
Amarillo	Actividad, impresión, nerviosismo.
Verde	Calma, reposo, naturaleza.
Azul	Frialdad
Negro	Inquietud, tensión.
Marrón	Calidez, relajación.
Rojo	Calidez intensa, excitación, estimulante.

2.5.1. Colores primarios y mezclas

Al descubrir Newton en 1665 que la luz del sol se dividía en varios colores al atravesar un prisma, estableció un principio aceptado hasta nuestros días: la luz es color. Newton observó que la luz natural estaba aparentemente formada por luces de seis colores.

Pero la diferencia fundamental al mezclar luces y pigmentos/tintes, fue reconocida primero por Helmholtz (1821-1834). La mezcla de luces se conoce como mezcla de color aditiva y la mezcla de pigmentos como mezcla de color sustractiva.

2.5.1.1. Mezcla de color aditiva

Una mezcla de color aditiva hace referencia a la mezcla de diferentes luces de distintas longitudes de onda, y se puede demostrar con gran facilidad superponiendo dos o más luces sobre una pantalla de proyección blanca.

En este tipo de mezclas, el rojo, el azul y el verde son utilizados como primarios para crear varios colores. Los colores resultantes a la hora de mezclar los primarios son los siguientes:

- ROJO + VERDE → AMARILLO
- VERDE + AZUL → CYAN
- AZUL + ROJO → MAGENTA
- ROJO + VERDE + AZUL → BLANCO

Los colores amarillo, magenta y cyan, son llamados colores secundarios. Por otro lado, al superponer los 3 primarios, lo que se consigue es el blanco.

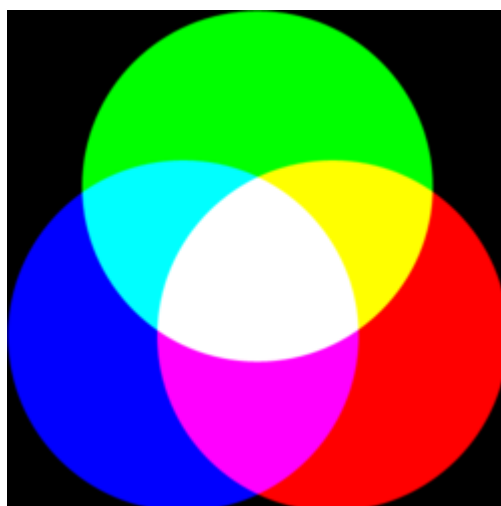


Figura 12: Mezcla aditiva

2.5.1.2. Mezcla de color sustractiva

Una mezcla de color sustractiva hace referencia a la mezcla de diferentes tintes, pigmentos o pinturas que absorben ciertas longitudes de onda y reflejan otras. Básicamente implica quitar energía de una muestra con la combinación adecuada de tintes y pigmentos.

En el proceso de absorción, la energía de la luz se transforma en calor y/o es absorbida por los átomos del material. Cuando la sustracción se hace solo por absorción, se dice que es una mezcla sustractiva simple. Cuando la luz es suprimida por dispersión y absorción, se dice que es una mezcla sustractiva compleja (que se verá mas adelante en la teoría Kubelka-Munk)

Los colores de los materiales transparentes como soluciones y cristales se producen debido a la sustracción simple de la energía de la luz por absorción. Se utilizarán pues filtros de luz con absorción selectiva para obtener los primarios, es decir, suprimiremos la luz azul, la verde y la roja de la luz blanca.

Los primarios utilizados en la mezcla sustractiva son:

- BLANCO – AZUL → AMARILLO
- BLANCO – VERDE → MAGENTA
- BLANCO – ROJO → CYAN

Estos filtros de banda, se conocen como filtros sustractivos primarios. Podemos observar que el filtro magenta absorbe la radiación verde, el filtro cyan la roja y el amarillo la azul. Si combinamos 2 filtros sustractivos tendremos como resultado los primarios de la mezcla aditiva.

- AMARILLO + CYAN → VERDE
- CYAN + MAGENTA → AZUL
- MAGENTA + AMARILLO → ROJO
- AMARILLO + MAGENTA + CYAN → NEGRO

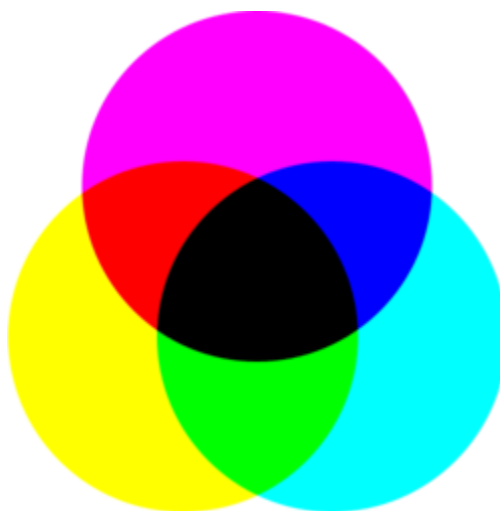


Figura 13: Mezcla sustractiva

Como se puede observar, la suma de los 3 primarios sustractivos, da cómo resultado el negro, cosa que parece bastante lógica ya que la mezcla sustractiva resulta de la supresión de componentes espectrales.

Cuando la energía de la luz es suprimida por dispersión y absorción, se produce el tipo de mezcla de color más complejo, denominada mezcla de color sustractiva compleja. Debido a que esta mezcla implica la absorción y dispersión simultanea de la luz, las leyes correspondientes a la mezcla deberían incluir 2 parámetros representando esos procesos, siendo esta ley mucho más compleja que la ley de mezclas sustractivas simples.

Para aplicaciones técnicas tales como pintura, plástico, textil, papel y muchos otros, la ecuación aproximada más utilizada para este tipo de mezclas complejas, es la dada por Kubelka y Munk, que se explicará mas adelante.

2.5.2. Colorantes

Los colorantes como los tintes y los pigmentos, al aplicarlos a un objeto, absorben selectivamente unas longitudes de onda de la luz incidente, mientras que reflejan o transmiten sus complementarias.

Los tintes (dyes) y los pigmentos (pigments) son componentes químicos responsables de buena parte de los colores que hay en la naturaleza. Se utilizan para dar color a tejidos, plásticos, madera, papel, cristal... Las características que presenta un objeto tintado o pigmentado se debe a la absorción y a la dispersión de la luz por parte de los colorantes. El colorante es identificado como tinte o pigmento en función de sus características.



Un pigmento es un material que cambia el color de la luz que refleja un material como resultado de la absorción selectiva del color. Los pigmentos son insolubles en el medio al que se aplican, por lo que absorben y dispersan la luz. Se dispersan en medios apropiados con un tamaño medio de partícula que varía de 100 a 1000nm. Los pigmentos son generalmente inorgánicos (se forman de manera ordinaria por la acción de distintas fuerzas físicas y químicas).

Los tintes son solubles en la materia a la que se aplican. La consecuencia principal de esto es que tienden a absorber la luz y no a dispersarla. Los tintes se aplican a los tejidos, al papel, a la piel a partir de soluciones acuosas o medios solventes o dispersiones.

2.5.3. Uso de rotuladores para diseño gráfico

Hoy en día, un buen diseñador tiene que hacer buenos bocetos para presentar sus proyectos, ya sean de arquitectura, de diseño de ropa, vehículos...para ello, a menudo utilizan rotuladores profesionales que no requieren de montaje previo ni de limpieza del mismo al acabar, lo único que hay que hacer, es ponerse y dibujar.

El rotulador fue creado en 1962 por un japonés llamado Yukio Horie. En los 80, se introdujeron los primeros rotuladores de seguridad con una tinta invisible pero fluorescente. Mediante esa tinta, se puede marcar cualquier tipo de objeto, que en caso de robo estará ya marcado.

A la hora de comprar unos rotuladores u otros, esto dependerá de a quien le preguntes. Cada diseñador tiene su marca preferida, pero la mayoría escoge de diferentes fabricantes para aumentar el número de colores de sus paletas.

La mayoría de las marcas tienen algo que ofrecer que las otras marcas no tienen, como es el caso de Pantone; que ofrece una gran variedad de colores y tonos debido a su sistema de representación de los colores de PANTONE.

Un rotulador, es un elemento de escritura, muy parecido al bolígrafo y que contiene su propia tinta. Las puntas, suelen estar hechas de un material poroso llamado fieltro.

En lo que a los rotuladores Tria de Lertaset (los utilizados en este trabajo) se refiere, las tintas están mezcladas en base de alcohol de xileno. Hay que tener cuidado a la hora de usar algunos rotuladores, ya que los que están disueltos en xileno pueden causar dolores de cabeza si no se tiene una buena ventilación el lugar de trabajo.

Una de las mayores ventajas a la hora de diseñar con rotuladores, es que cuando ya tienes más o menos claro los colores que vas a usar, puedes recrear exactamente los mismos tonos y efectos una y otra vez.

En cuanto a las desventajas de los rotuladores, es que no se mezclan tan bien como las pinturas mezcladas con agua.

Las dos propiedades más deseadas por los diseñadores a la hora de realizar un boceto o un diseño son: la transparencia y la habilidad para saturar con tintes de color. Desafortunadamente estas dos propiedades están inversamente relacionadas, ya que cuanto más transparente es el papel, la absorción del color es menor y viceversa.

2.6. TEORIA KUBELKA - MUNK

La medición instrumental del color desarrollada en las últimas cinco décadas, ha sido de gran avance para el campo de la tecnología del color.

Con esta implementación de la medida de color instrumental, uno podría estar interesado en predecir la naturaleza y las concentraciones de los colorantes para obtener una curva de reflectancia deseada o a la inversa, predecir la reflectancia de un objeto tintado o pigmentado que contiene una cantidad conocida de colorante. En el apartado de predicción de color de este trabajo se abordará este tema mediante la teoría de Kubelka-Munk, pero antes se explicará en que consiste esta teoría.

La teoría de la reflectancia de Kubelka-Munk fue desarrollada en un principio para 'paint films', pero la verdad es que es una muy buena teoría para medidas realizadas sobre papel. Cuando la absorción de la luz alcanza niveles elevados, la teoría no es demasiado buena (para el caso de papeles tintados demasiado oscuros o no-blanqueados). Una

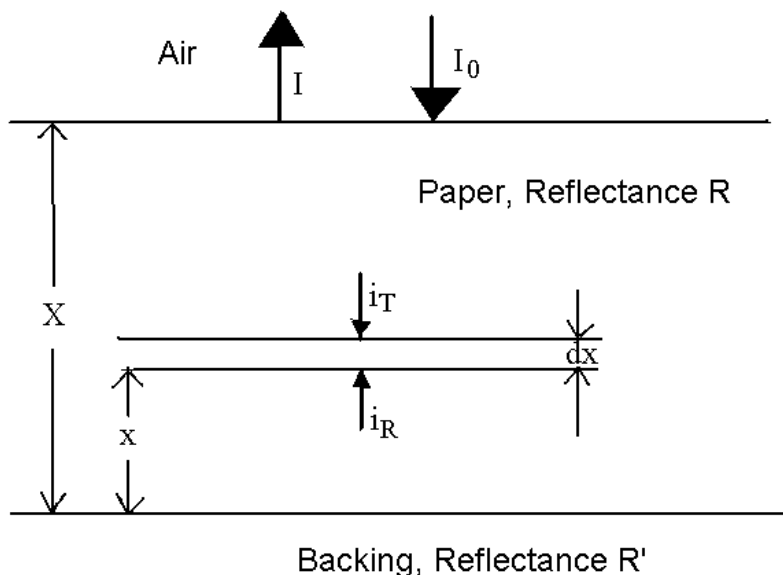
limitación impuesta, será que las partículas que formen la capa, serán mucho más delgadas que el grosor total de la muestra.

Para objetos opacos, como por ejemplo el papel, la mezcla de color sustractiva compleja aumenta la reflectancia difusa. Esta reflectancia difusa no es proporcional a la concentración de colorantes, pero si que hay alguna función de los factores de reflectancia R que es proporcional a la concentración.

$$F(R) = \frac{K}{S} = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (1.13)$$

Los colores producidos por mezcla de colorantes pueden ser calculados por medio de la ecuación Kubelka-Munk. Cuando un haz de luz incide en una muestra tintada o pigmentada, la energía radiante interactúa con las partículas/moléculas de los colorantes, lo que produce **dispersión** y **absorción** de la luz.

En el proceso de absorción, la energía luminosa es absorbida por el colorante y transformada en calor, la cual desaparece en el proceso de iteración, aunque a veces la energía absorbida reaparece en algunas longitudes de onda. A esto se le denomina fluorescencia y no está incluido en la teoría de Kubelka-Munk. Para simplificar el proceso, solo se tendrán en cuenta la dispersión y absorción de la luz dentro del medio; en nuestro caso el papel y las capas de rotulador. En la dispersión, se modifica la dirección del rayo de luz. Con todo esto, lo que se tiene es un modelo físico simple, como se puede observar en la figura de abajo.



La I_0 , es la intensidad de la luz incidente sobre el papel de grosor X y reflectancia R . Detrás del trozo de papel la reflectancia R' . I , intensidad de la luz que reemerge de la base del papel después de la dispersión, absorción o transmisión de I_0 . A distancia x de la parte trasera del papel, se encuentra una fina lamina de grosor dx y la luz dispersada incidente que viaja da arriba abajo i_R e i_T respectivamente

Kubelka y Munk imaginaron que el flujo radiante dentro de un medio podía resolverse en dos flujos, uno que iba en dirección descendente y otro en dirección ascendente. A este modelo, se le conoce como modelo de dos flujos. El medio viene caracterizado por dos parámetros ópticos K y S introducidos empíricamente y conocidos como coeficientes Kubelka-Munk de absorción y dispersión.

Como el haz de luz se propaga en el medio, su energía disminuye en cada canal debido a la absorción y dispersión. La energía perdida a causa de la dispersión en un canal, es añadida al otro canal. Si llamamos I al flujo entrante y J al flujo que se mueve de modo ascendente, entonces el modelo físico se podría escribir de la siguiente manera:

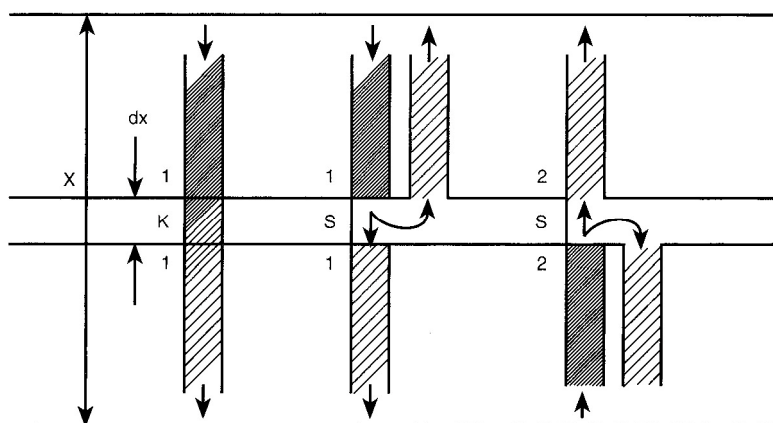


Figura 14: Modelo físico de Kubelka-Munk para la formulación matemática de la interacción de una luz incidente en colorantes

El área sombreada representa la proporción de energía de un haz. dx es un elemento del espesor de la muestra a través de donde se produce la dispersión y absorción

- $\frac{dI}{dx} = - (K+S)I + SJ \rightarrow$ energía perdida en el canal, debido a K y S (absorción y dispersión)
- $\frac{dJ}{dx} = - (K+S)J + SI \rightarrow$ energía recibida en el canal, debido a la dispersión desde el otro canal.

Estos dos términos, describen el tanto por cien del cambio de flujo en cada canal, ya que el rayo atraviesa un medio que contiene colorantes. dI/dx tiene signo negativo, por que se propaga en la dirección de x negativo. La dispersión y absorción de la luz en cada flujo, se toma como una fracción de la energía ponderada en cada flujo por las constantes de absorción y dispersión de K-M. De esta manera el primer término de las ecuaciones de arriba representa la energía perdida en el canal debido a la absorción y dispersión, y en la segunda ecuación, en cambio, se representa la energía recibida en el canal respectivo debido a la dispersión desde el otro canal.

Las dos ecuaciones anteriores son las que constituyen la base de la teoría K-M. Kubelka y Munk resolvieron estas ecuaciones y las transformaron en series de ecuaciones que contienen parámetros que se pueden medir.

A continuación se presentarán las ecuaciones necesarias para la cubrir el objetivo de este proyecto, comenzando por la formula de la reflectancia de una muestra pintada sobre una capa:

$$R = \frac{1 - R_g (a - b \coth bSx)}{a - R_g + b \coth Sx} \quad (1.14)$$

Donde

$$a = 1 + \frac{K}{S} \quad y \quad b = \sqrt{a^2 - 1}$$

$R_g \rightarrow$ Reflectancia del fondo en el que la muestra está pintada

$R \rightarrow$ Reflectancia de la muestra

$X \rightarrow$ Espesor de la muestra

$K \rightarrow$ Coeficiente de absorción K-M del colorante, en este caso la tinta.

$S \rightarrow$ Coeficiente de dispersión K-M del la tinta de rotulador.

$\coth \rightarrow$ Cotangente hiperbólico.

K y S se definen en términos de transmitancia y reflectancia de la capa.

En el diseño gráfico, al dibujar y pintar sobre el papel con el rotulador, el papel no contribuirá a la hora de medir la reflectancia. A esto se le conoce como muestra en “espesor finito”, por lo que la ecuación anterior quedaría de la siguiente manera con la $R_g = 0$.

$$R_\infty = 1 + \frac{K}{S} - \sqrt{\left(\frac{K}{S}\right)^2 + 2 \left(\frac{K}{S}\right)} \quad (1.15)$$

En donde R_∞ se refiere a la reflectancia de la muestra a espesor finito. La inversa de esta ecuación queda pues de la siguiente manera:

$$F(R_\infty) = \frac{K}{S} = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} \quad (1.16)$$

$F(R_\infty)$ se conoce como la función Kubelka-Munk. Como para el resto del proyecto se utilizarán solo muestras de rotulador con espesor finito, escribiremos R en vez de R_∞ para simplificar la formula. Con lo que la ecuación K-M podrá escribirse como la ecuación (1.13)

$$F(R) = \frac{K}{S} = \frac{(1 - R)^2}{2R}$$

Las dos ecuaciones anteriores, son relaciones muy conocidas de la teoría de K-M. Con todo esto, se podrá correlacionar satisfactoriamente la reflectancia con las características ópticas de la tinta de rotulador. Además, la función $F(R)$ de K-M mantiene una relación lineal con la concentración del colorante; con lo que se establece que no R , sino $(1 - R)^2 / 2R$ es directamente proporcional a la concentración como se muestra a continuación:

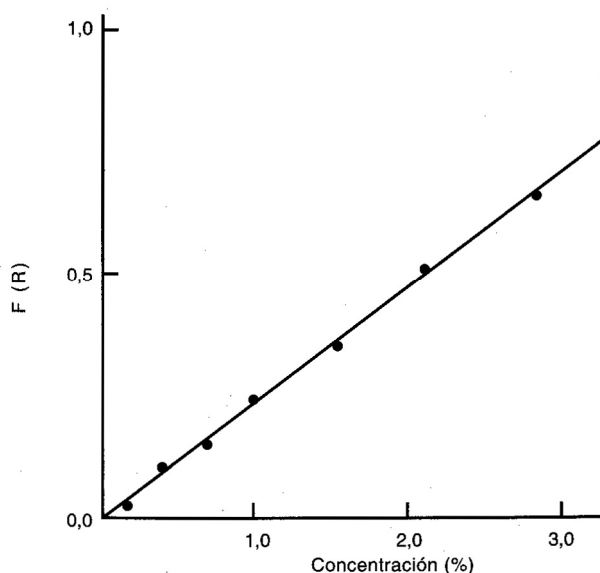


Figura 15: Cuadro esquemático de la función Kubelka-Munk vs la concentración

Esta característica forma la base importante de la función K-M a la hora de realizar cálculos para la predicción de color. En el apartado de predicción de color, se especificarán las formulas y detalles de todo lo relacionado con esto.

2.6.1. Aplicaciones de la teoría K-M

Esta teoría ha supuesto una contribución significativa en la igualación del color de varios productos industriales. Una de las características más valiosas de la teoría Kubelka-Munk es que los coeficientes de absorción y dispersión para una mezcla de colorantes, pueden crearse a partir de los coeficientes de absorción y dispersión unitarios de cada tinte

$$K_M = c_1 k_1 + c_2 k_2 + \dots + c_n k_n + K_b$$

$$S_M = c_1 s_1 + c_2 s_2 + \dots + c_n s_n + S_b$$

K_M y S_M representan los parámetros respectivos a la mezcla de colorantes. k y s están normalizados, o son coeficientes K-M unitarios determinados en experimentos separados. Los subíndices 1,2,...n identifican a los colorantes individuales. El subíndice b, en este caso, se refiere al papel (superficie sobre la que están las muestras) o sustrato, y $c_1, c_2, c_3 \dots c_n$ son concentraciones de colorantes.

$$\left(\frac{K}{S}\right)_M = \frac{c_1 k_1 + c_2 k_2 + \dots + c_n k_n + K_b}{c_1 s_1 + c_2 s_2 + \dots + c_n s_n + S_b} \quad (1.17)$$

Dependiendo de las radiaciones incidentes con los colorantes, el método de aplicación de la teoría K-M de diversos productos, será levemente distinto. En las dispersiones con un pigmento, ocurre que cada pigmento absorbe y dispersa luz, por lo que sería necesario saber los coeficientes de absorción y dispersión de cada pigmento para pronosticar la reflectancia de la mezcla de colorantes utilizando las ecuaciones (arriba y infinito). A este tipo de aplicaciones se las denomina teoría K-M de dos constantes.

En el caso del diseño gráfico mediante rotuladores, las moléculas del tinte emigran o se disuelven en el papel. Es por esto por lo que la dispersión en una muestra de papel pintada se debe por completo al sustrato y las moléculas del tinte solo absorben la luz. Este modo de aplicación se denomina teoría K-M de constante única.

En este caso, la dispersión por moléculas de tinte en papel puede omitirse, con lo que para una combinación de tres rotuladores, la ecuación anterior toma la siguiente forma:

$$\left(\frac{K}{S}\right)_M = \frac{c_1 k_1 + c_2 k_2 + \dots + c_n k_n + K_b}{S_b} \quad (1.18)$$

Aquí la molécula de la tinta es absorbida por el papel, por ello cada color de rotulador está caracterizado por una constante única k/s .

Con todo esto se deduce que la teoría de igualación de color para el diseño gráfico está basada en el modo de aplicación de la constante única de la teoría de K-M. La función K-M de un papel pintado es una función lineal de una concentración de tintes. Este hecho se utiliza para determinar el (k/s) de cada tinte en diferentes longitudes de onda. La linealidad de la función K-M con una concentración y su naturaleza aditiva se aproxima al uno, tal y como aparece en la *figura 7*.

En el apartado de predicción de color se detallarán más aspectos sobre este tema.

La teoría Kubelka Munk, es una versión muy simplificada de la teoría de la dispersión múltiple, debido a que las expresiones teóricas de la teoría K-M están de una forma directamente aplicable. Por esto es por lo que fue inmediatamente aceptada para la aplicación de problemas industriales.

Otros aspectos tales como: que la teoría K-M funciona mejor para bajas absorciones que para altas; que se realizaron muchas simplificaciones a la hora de las derivaciones y que los coeficiente K y S no tienen un significado físico [2], han motivado a muchos físicos a revisar esta teoría e introducir nuevas variantes.

Las cantidades K y S son definidas en términos de transmistencia y reflectancia, no tienen significado físico. Un modelo simple, requiere relacionar K y S con las propiedades ópticas fundamentales del material: absorción (α) y dispersión (s):

$$K=2\alpha, \quad S=s$$

Coeficientes intrínsecos de absorción (α) y dispersión (s) para el caso de una iluminación difusa

A diferencia de K y S las cantidades de s y α son físicamente significativas. Asumiendo que la luz se difunde isotrópicamente (resultados idénticos con independencia de la dirección escogida para la medida) solo la mitad mayor es dispersada y contribuye a la reflectancia.

Haciendo uso de un análisis estadístico de la propagación de la luz en el medio, proponen una revisión en la teoría de Kubelka y Munk teniendo en cuenta la difusión de la luz a lo largo del camino que recorre la misma hasta que llega al papel. Con esto, lo que investiga, es la nueva relación entre los coeficientes K-M de absorción y dispersión K y S y los coeficientes intrínsecos de dispersión y absorción del material que indican que K y S dependen no-linealmente con α y s . [3]

En otras ocasiones se extiende la aplicabilidad de la extensión de la teoría K-M a un medio óptico no homogéneo, tratando con distribuciones de tintas homogéneas, lineales y exponenciales que penetran en el sustrato. Las simulaciones de la reflectancia espectral realizadas, predicen una depresión de reflectancia en los picos y una reducción en las bandas de absorción características del tono y una significativa reducción en la saturación; en el gamut [4].

En otros casos, se estudia cuando la luz se propaga en un medio turbio y los rangos de absorción son mayores. Las aplicaciones se realizaron sobre hojas de papel tintado [5].

2.7. PREDICCIÓN DE COLOR

Una de las aplicaciones de la teoría K-M, como ya se ha comentado, es la de que los coeficientes de absorción y dispersión para una mezcla de colorantes, pueden crearse a partir de los coeficientes de absorción y dispersión unitarios de cada tinte. Lo que se pretende realizar pues en este apartado de predicción de color, es hacer predicciones de las mezclas de colores, con el valor medio de K/S de los diferentes colores y los del papel.

También se compararán las coordenadas de color CIEL*a*b* de la mezcla predicha (la teórica) con las de la mezcla real (la realizada con los propios rotuladores sobre papel).

2.7.1. Leyes de mezcla de color y teoría óptica

Cuando se explico la teoría Kubelka-Munk, se vio que la variación de la reflectancia de los colores en una superficie en una longitud de onda y una concentración dada, no es una función simple de la reflectancia de un componente individual en un tinte de una mezcla. Pero con la función K-M, si que tenemos las formulas apropiadas para predecir la reflectancia de una muestra tintada a partir de la mezcla de colorantes conocidos (ecuaciones 1.13 y 1.15)

Estas dos ecuaciones, son solo válidas para una única longitud de onda. Por lo que para poder representar la reflectancia, tendremos 39 ecuaciones simultáneas (de 360 a 740nm con saltos de 10nm (en nuestro caso)).

La función F(R) o K/S de una mezcla de tintes, se puede expresar como suma ponderada de la unidad K/S de cada colorante frente a la concentración, con lo que nos queda una ecuación del tipo:

$$\frac{K}{S} = c_1 \left(\frac{k}{s} \right)_1 + c_2 \left(\frac{k}{s} \right)_2 + c_3 \left(\frac{k}{s} \right)_3 \quad (1.19)$$

Por lo que en el caso de una mezcla sustractiva compleja, la reflectancia y por lo tanto el color, podrán predecirse con las ecuaciones 1.13 y 1.15, siempre que se conozcan los coeficientes k/s de la unidad K/M para cada colorante.

2.7.2. Igualación del color utilizando la teoría K-M de constante única

Cuando en una empresa se recibe un estándar o una muestra de un determinado color, lo primero que hay que hacer, es medir la reflectancia de dicha muestra. Las operaciones matemáticas para la igualación del color pueden efectuarse empleando la teoría K-M y las ecuaciones CIE para el cálculo de color.

En el estudio que se está realizando, el tono que se pedirá, se producirá con tres colores, con los rotuladores cyan magenta y amarillo. La función K-M de la muestra estándar, se determinará utilizando la ecuación 1.13.

Así la función F(R) podrá expresarse como sumatorio de los tres coeficientes de la unidad K/S de los tintes ponderados, frente a la concentración de los tintes respectivos.

$$\left(\frac{K}{S} \right)_M = c_1 \left(\frac{K}{S} \right)_1 + c_2 \left(\frac{K}{S} \right)_2 + c_3 \left(\frac{K}{S} \right)_3 \quad (1.20)$$

El sufijo M representa el parámetro correspondiente para la mezcla de los tintes. (k/s)_b es la función K-M correspondiente al sustrato (papel en blanco), y los subíndices 1, 2 y 3, se corresponden con los tintes respectivas de los rotuladores cyan, magenta y amarillo. Para simplificar la formula, sustituiremos la función normalizada k/s por la letra 'a', con lo que la ecuación anterior nos quedará de la siguiente manera:

$$F(R_M) = c_1 a_1 + c_2 a_2 + c_3 a_3 + f(R_s) \quad (1.21)$$

$F(R_M)$ y $f(R_s)$ son la función K-M para la muestra y el sustrato. Esta ecuación es válida para una longitud de onda simple, por esa razón, la longitud de onda, se especifica mediante subíndices como $a_{1\lambda}$, $a_{2\lambda}$, $a_{3\lambda}$:

$$F(R_M) = c_1 a_{1\lambda} + c_2 a_{2\lambda} + c_3 a_{3\lambda} + f(R_{s\lambda}) \quad (1.22)$$

2.7.3. Predicción de la formula de color, utilizando datos de tres longitudes de onda

Debido a que la relación entre la reflectancia y la concentración del colorante, requiere de unos cálculos bastante largos y complicados, se describirá un método simple para la igualación del color para el diseño mediante los rotuladores utilizados en este trabajo.

En la industria del diseño gráfico, suele ser común mezclar colores para poder obtener algún tono que no se encuentre entre la paleta de tonos que se tenga o entre los rotuladores de los que se dispone. En este estudio, el tono habrá sido reproducido por tres colores, el amarillo, magenta y el cyan. Por esa razón, las ecuaciones contendrán tres constantes desconocidas c_1 , c_2 y c_3 . Para la determinación de estas tres constantes, necesitaremos tres ecuaciones simultáneas.

Estas son las tres ecuaciones que corresponden al pico máximo de reflexión de los tres tintes (los cuales se obtienen de las gráficas de reflectancia).

$$\begin{aligned} F(R_{M\lambda^1}) &= c_1 a_{1\lambda^1} + c_2 a_{2\lambda^1} + c_3 a_{3\lambda^1} + f(R_{s\lambda^1}) \\ F(R_{M\lambda^2}) &= c_1 a_{1\lambda^2} + c_2 a_{2\lambda^2} + c_3 a_{3\lambda^2} + f(R_{s\lambda^2}) \\ F(R_{M\lambda^3}) &= c_1 a_{1\lambda^3} + c_2 a_{2\lambda^3} + c_3 a_{3\lambda^3} + f(R_{s\lambda^3}) \end{aligned} \quad (1.23)$$

Aquí, los subíndices λ^1 , λ^2 , y λ^3 son tres longitudes de onda que corresponden a la absorción máxima de los tres tintes respectivamente. 'a' representa el coeficiente de absorción o los datos ópticos de los tintes. Los subíndices 1, 2 y 3 se refieren a los tintes (cyan, magenta y amarillo). $f(R_{s\lambda^1})$ es la función K-M para el papel 'en blanco' que va a ser pintado para la realización de las muestras.

Una vez que tengamos las 3 concentraciones de los tres rotuladores que necesitamos para igualar un color dado, sacaremos la curva de reflectancia.

2.7.4. Mezcla de Pantones

Para la correcta mezcla de colores, con los rotuladores Tria de Pantone, lo primero que hay que saber, es, que cuando dos colores de Tria se superponen, la combinación de estos obviamente, da un tercer color. Esto no solo depende de los colores utilizados, sino del orden en el que son empleados, siendo el color que tiende a dominar el último en ser

aplicado.

Si mezclamos dos colores pálidos, la mezcla, será correcta, pero si un color es mucho más oscuro que el otro, bloqueará totalmente al color mas claro.



Se comprobará más adelante, la diferencia que existe en aplicar primero un color u otro mediante las curvas de reflectancia, para el caso de mezclar el amarillo con el verde, o el verde con el amarillo.

METODO OPERATIVO

3. METODO OPERATIVO:

Lo que se pretende realizar en este proyecto, es recoger los valores de reflectancia de las muestras pintadas con cada color de rotulador con un espectrofotómetro, para así poder evaluar distintos parámetros tales como la reflectancia, valores K/S, valores de L^* a^* b^* , diferencia cromática y comparación con la gama de tonos Pantone.

A continuación se explicaran todos los materiales utilizados, así como el método de medida que se ha llevado a cabo, pero antes, se comentará el estudio preliminar que se llevó a cabo para poder controlar mejor el espectrofotómetro y decidir hasta que número de capa era necesario pintar.

3.1. MATERIALES UTILIZADOS

En este apartado, se detallarán las características de los materiales utilizados para la realización de este proyecto, desde el modelo de espectrofotómetro utilizado, hasta las características de los rotuladores utilizados etc.

3.1.1. Espectrofotómetro CM-2500d

La realización de las medidas, se han llevado a cabo mediante el espectrofotómetro CM-2600d / 2500d de Konica Minolta.

Este espectrofotómetro, es muy fácil de usar debido a que se sostiene con una mano, y se opera con dos dedos. Dispone de una rueda, con la que seleccionaremos los diferentes modos pulsándola, y girándola podremos pasar de un parámetro a otro. Es innovador, de alta calidad, robusto, durable y económico.



El CM-2500d de Konica Minolta, consta de las siguientes características:

Tiene dos aperturas para la captura y medición de las muestras: 3mm y 8mm. Medición simultánea SCI / SCE (componente especular incluido / excluido). Perfecto para medir materiales fluorescentes, papel, textiles, o cualquier tipo de producto.

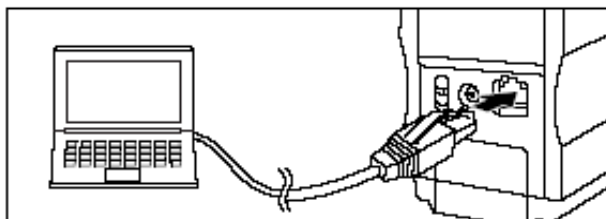
Más adelante, se especificarán los pasos seguidos a la hora de haber realizado las medidas con este espectrofotómetro.

3.1.2. Software SpectraMagicNX

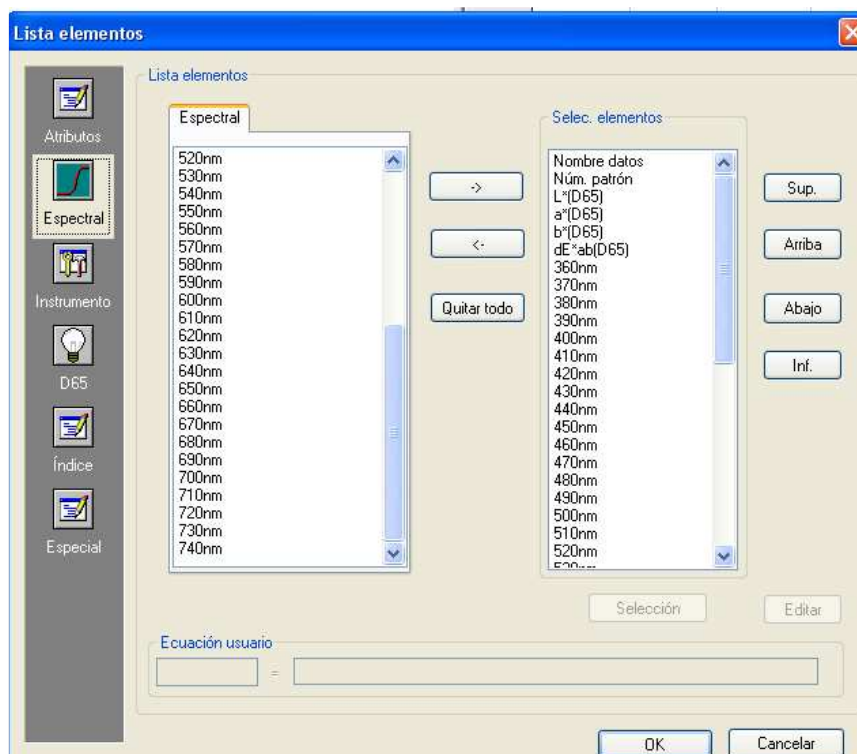
SpectraMagicNX, es el software que acompaña al espectrofotómetro CM-2500d, para poder obtener los resultados realizados medidos y poder visualizarlos de manera gráfica.

Podemos medir con el espectrofotómetro conectado al software SpectraMagic NX (con el espectrofotómetro en modo remoto) o bien con el espectrofotómetro para luego transferir los datos al software (mediante un cable RS 232C) y poder operar con ellos después desde Excel. Se probaron las dos maneras, pero al final las medidas se realizaron con el espectrofotómetro y después se transfirieron los datos al software.

Para conectarnos con el software, una vez que estamos en modo remoto, solo tendremos que conectar el espectrofotómetro al ordenador mediante el cable RS 232C darle a INSTRUMENTO → Conectar, para conectarnos con SpectraMagic NX.



Antes de descargar los datos, se colocaron los parámetros que se deseaban visualizar en el software para poder copiar luego los datos y pasarlos posteriormente a Excel. Sin más que entrar en DATOS → Lista elementos.



Después de poner los datos que deseamos recibir en una lista, lo siguiente que haremos, será descargar los datos; para ello, lo que haremos será, en INSTRUMENTO → Recibir/Enviar → Recibir muestras, para transferir los datos al software.

Una vez se tengan los datos descargados en el software, aparecerán todos los datos en la siguiente tabla, y sin más que hacer un copy & paste, podremos pasar los datos a Excel.

	Nombre	dE	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*(D65)	h(D65)	360nm	370nm	380nm	390nm	400nm	410nm	420nm
1	[Datos]	----	54.34	59.80	22.36	63.85	20.50	6.45	7.06	7.48	7.87	8.94	10.80	11.71
2	[Datos]	----	48.23	54.15	20.05	57.74	20.32	5.74	6.44	6.88	7.17	8.03	9.58	10.42
3	[Datos]	----	70.63	25.88	3.45	26.10	7.58	8.31	8.98	9.91	11.39	15.42	24.86	35.36
4	[Datos]	----	57.83	58.07	42.27	71.83	36.05	4.78	5.15	5.37	5.49	5.85	6.45	6.71

3.1.3. Rotuladores TRIA y complementos

Rotuladores:

Para la realización de este estudio, hemos utilizado los rotuladores Tria de Letraset. Estos rotuladores están rellenos de una base de alcohol de xileno, constan de tres puntas y de una gran variedad de tonos, colores catálogos, materiales de recambio y mezcla...

La gama o set de rotuladores que se ha utilizado para la elaboración de este estudio, es la de los colores brillantes (*bright colours*), que consta de doce rotuladores.



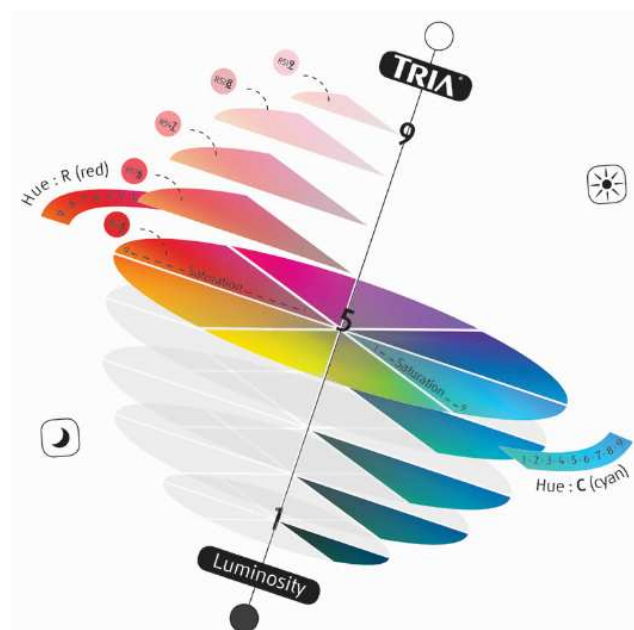
Las 3 puntas:



Estos rotuladores TRIA, constan de tres puntas; una fina otra llamada *brush* (más gruesa que la fina) y la más gruesa, *chisel*. A parte de estas puntas, existen otras para poder dar al rotulador la mejor forma para obtener así un trabajo óptimo, y que mejor se adapte a las necesidades del diseñador.

Espacio de color HSL:

Tria, utiliza un espacio de color para representar y definir sus más de 300 colores diferentes. El espacio de color, es el llamado HSL (Hue, Saturation and Luminosity), los tres elementos o atributos básicos para definir el color.



Estos tres elementos, pueden verse representados en un diagrama tridimensional. La escala del matiz se sitúa en el eje exterior, con la saturación en el eje horizontal y la luminosidad o intensidad en el vertical.

El sistema HSL está representado por valores numéricos, lo que significa que modificando los valores de HSL conseguimos exactamente el color que queremos representar.

La mayoría de las aplicaciones gráficas de softwares utilizan el Espacio de color HSL, por lo que compartiendo este método, el espacio de color Tria es muy cercano a la hora de diseñar algo digitalmente.

La representación del color en Tria consta de cuatro partes:



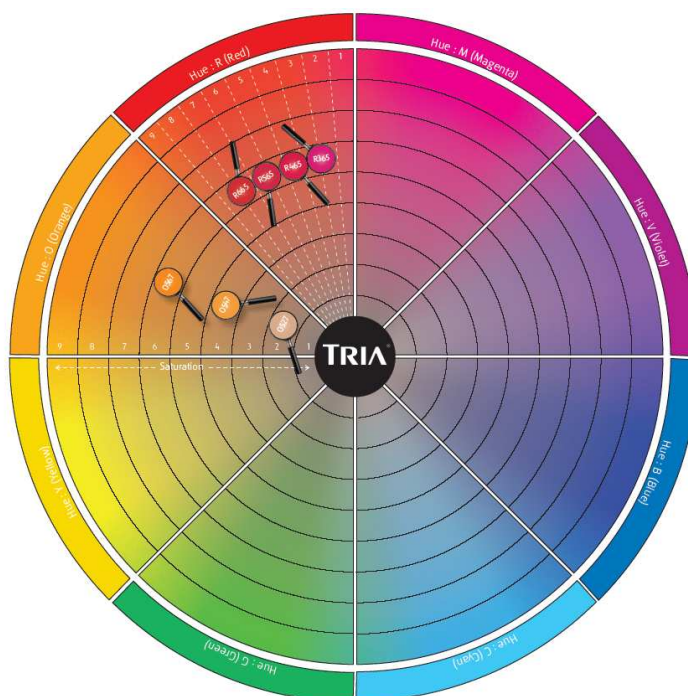
1. Componente alfa :

Es una rueda de 360°, compuesta por los 8 colores principales, que nos dirá en que color nos encontramos, en este caso tenemos la R de red, ósea el rojo. Los 8 colores principales son:

Rojo (*red*), Naranja (*Orange*), Amarillo (*Yellow*), Verde (*Green*), Cian (*Cyan*), Azul (*Blue*), Violeta (*Violet*) y Magenta (*Magenta*).

2. Matiz (Hue, primer dígito):

El matiz, es el propio color de la muestra. Cada color principal, está dividido en 9 segmentos. El matiz tira para el naranja, a medida que crece el segmento. Cada segmento de matiz, son 5° más, a medida que es mayor.

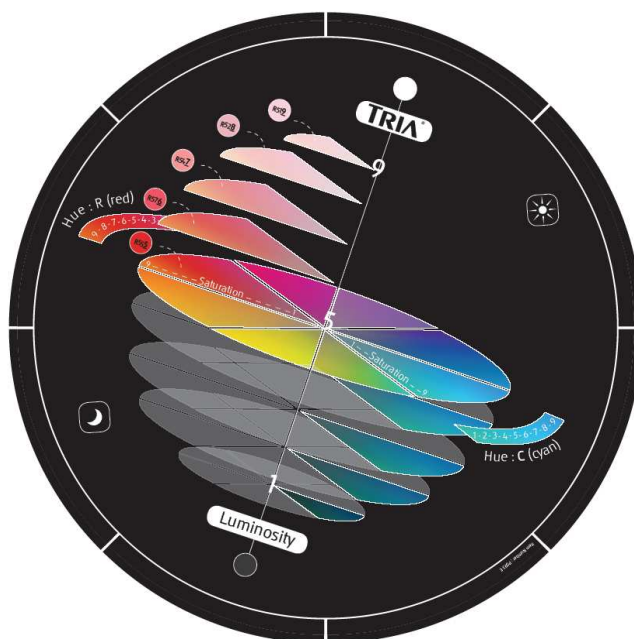


3. Saturación (Saturation, segundo dígito):

La saturación nos dice, como de vivo es nuestro color y está dividido en 9 pasos iguales. Cada paso está segmentado desde el centro (nivel 1) hasta el borde del círculo (nivel 9). Un nivel 9, sería fluorescente, y un nivel 5 no sería ni muy gris, ni muy vivo.

4. Intensidad (Luminosity, tercer dígito):

Con la intensidad, determinamos lo oscuro o claro que es un color. Está dividido en 9 pasos iguales y va verticalmente desde el nivel 1 (abajo del diagrama, negro), hasta el nivel 9 (arriba del diagrama, blanco (pasteles))



Cuadernos Letraset:

Es un papel especial para rotuladores de alta calidad, en los que se realizan bocetos y visuales. Este papel ha sido diseñado para dar óptimos resultados con los rotuladores, tintas y brushpens de Tria. Cada cuaderno consta de 50 hojas, todas ellas a prueba de sangrado de tinta, es decir, a prueba de emborronado.



Cartas de color:

Son tiras de papel-cartón de determinado gramaje y textura. Existen tres tipos de papel: **coated** (papel couché, el de revista), **uncoated** (papel no estucado), **solid matte** (papeles sin brillo), con la impresión de una muestra de color, su nombre y formulas para obtenerlo. Una vez realizadas las muestras, comprobaremos cual es el color más aproximado de cada muestra mediante cartas de color.



A estas cartas de color se les llama ‘*PANTONE Color formula guide*’, que es el estándar de la industria para la selección y especificación de formulas para mezclar tintas de los colores PANTONE MATCHING SYSTEM®

En éste caso, se utilizará la carta de PANTONE solid matte (satinada mate, sin brillo), puesto que es la que más se aproxima a las muestras de rotulador que se han realizado en el papel especial de *Letraset*.

Estas cartas de color, constan de:

- 1114 colores planos PANTONE MATCHING SYSTEM® incluyendo una completa sección de 147 nuevos colores planos inspirados en el diseño.
- 7 colores metalizados adicionales, 4 colores CMYK y 6 colores Hexachrome.
- Una nueva edición satinada mate adicional a las ediciones mate y brillo. Impresos en papel extrablanco para reflejar las últimas tendencias del diseño.
- Identificados los colores que se pueden obtener en cuatricromía.
- CD-ROM para importar nuevos colores en las aplicaciones de autoedición.

Hexacrome es un proceso de impresión de 6 colores de alta fidelidad desarrollado por Pantone. Abarca un rango mayor de color que los sistemas tradicionales, permitiendo a creativos y diseñadores desarrollar mejor sus ideas. Hexacrome permite imprimir lo que se está viendo en pantalla sin opacar o desmejorar los colores.

3.1.4. Pantone Color Cue 2

En esta sección lo que se ha realizado, ha sido una comparación del tono pantone que más se aproxima a las muestras creadas, con el resultado que ofrece el Pantone Color Cue 2.

El Pantone Color Cue 2, es un colorímetro de mano, con el sistema de colores Pantone integrado en una memoria interna. Es una herramienta muy valiosa para todo el mundo que trabaje con el color, ya sean diseñadores gráficos, impresores, fotógrafos, diseñadores en moda, artistas y arquitectos, decoradores de interiores...debido a que se puede medir en cualquier superficie para encontrar el color Pantone más cercano a cualquier muestra.



Este colorímetro, nos proporciona el porcentaje de tinta para crear el color Pantone, pudiendo indicar los siguientes parámetros:

- Valores CMYK y CMYK Euro (Cyan, Magenta, Yellow, Black)
- Valores Hexachrome CMYKOG (Cyan, Magenta, Yellow, Black, Orange, Green)
- Valores RGB100 y RGB255
- Valores HTML (colores Web)
- Valores Lab (Daylight, 6500K)

3.1.5. Cabina de iluminación Macbeth Spectralight III

Para la correcta visualización de las muestras, se ha utilizado la cabina de iluminación Macbeth Spectralight III que proporciona diferentes fuentes de luz:

Fuentes de Luz:

- Luz de Día (Daylight)
- Fluorescente 1
- Fluorescente 2
- Incandescente (A)
- Ultravioleta
- Otras: D50, D65 o D75, luz Fría Fluorescente



En esta cabina, es donde los diferentes observadores han intentado aproximar las muestras, al tono Pantone (solid matte) más cercano, con el iluminante D65, para poder hacer un estudio posterior de las coincidencias y diferencias a la hora de determinar un tono u otro y las diferencias con respecto a las medidas realizadas con el *Pantone Colour Cue 2*.

Valoración visual:

Para una correcta visualización de la muestra y el estándar, estas deben de estar una al lado de la otra y bajo unas condiciones de iluminación normalizadas.

El ojo humano es un sensor discriminativo increíble para detectar pequeñas variaciones de color entre muestras, pero lo que no puede realizar es una valoración de la magnitud de la diferencia entre dichos colores (para ello, ya están las ecuaciones de diferencia de color).

La fuente de luz, las condiciones de iluminación, visión y el entorno, son parámetros que tendrán un gran impacto en la valoración visual de las muestras. La fuente de luz, deberá ser la luz correspondiente a la de un día soleado, natural o simulada. Lo que podría ocurrir con la luz natural, es que pueden existir variaciones espectrales de la misma, y el ojo humano que puede adaptarse fácilmente a estas variaciones podría visualizar muestras bajo condiciones de iluminación diferentes. A menudo no somos conscientes de la importancia de la constancia en las condiciones de iluminación que deben de existir a la hora de evaluar visualmente; más concretamente en la igualdad del color.

Con todo esto, se deduce que es mejor utilizar fuentes artificiales de luz, como en nuestro caso, con la cabina de iluminación *Macbeth Spectralight III*.

Las condiciones geométricas de observación, están directamente relacionadas con el color percibido por el observador, como por ejemplo; la dirección de la iluminación y la visión. Para una correcta valoración del color, la muestra debe de estar iluminada sobre la perpendicular y observada a 45°.

Otro problema, podría ser la variabilidad del observador, para ello, hemos realizado un test de visión del color a los diferentes observadores que han participado en un test realizado, el cual se detalla a continuación.

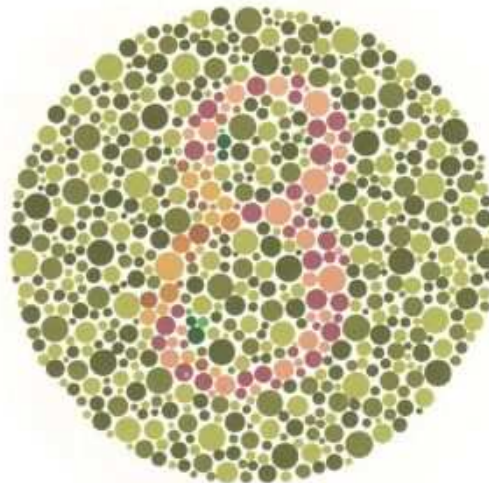
3.1.6. Libro de Ishihara's test for colour Blidness

Este libro lo hemos usado con el objetivo de identificar a observadores con una visión del color defectuosa. El libro consta de varias láminas, en las que encontramos números matemáticos y figuras impresas con puntos de diferentes colores y tamaños, y rodeadas también de puntos de otros colores.



Libro de Ishihara's test for Colour Blindness

Pongamos como ejemplo la lámina que se muestra a continuación:



Consiste en la figura del número 8 perfilada con puntos rojos amarronados, contorneado por puntos verde-oliva. Una persona normal (sin ninguna discapacidad en la visión del color) vería un 8, pero una persona que tenga deficiencia en los rojos-verdes, lo leerá como un 3, debido a que en la parte izquierda del 8, hay unos círculos anaranjados que no será capaz de distinguir de los tonos verdes-oliva del fondo.

Este test, hay que realizarlo bajo unas condiciones de iluminación que imiten la luz del día de un país en el hemisferio norte, en nuestro caso, el test lo hemos realizado en la cabina de iluminación *Macbeth Spectralight III*, con el iluminante D65.

Otro factor, es el número de errores que se le permite realizar a un observador hay que especificarlo de antemano. A partir de la decimoquinta edición del libro, se introdujeron tablas con niveles de error. En nuestro caso, como el test lo hemos realizado para las primeras 13 láminas del libro (todo números matemáticos), consideraremos que a partir de 2-3 errores que la persona puede ser tricrómata, y no haber tenido jamás ninguna dificultad para nombrar o emparejar colores. Estas personas, no serán clasificadas como ciegas de color, pero si que son consideradas como personas que tienen menos precisión, ya que su abanico de colores es más restringido.

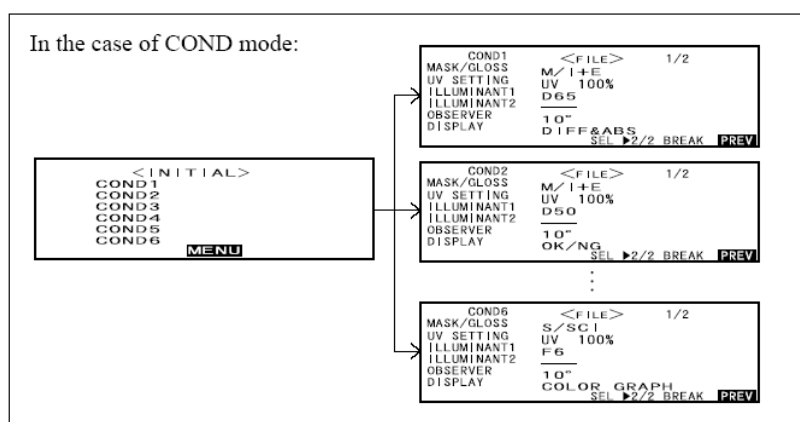
3.2. MEDIDAS REALIZADAS CON EL ESPECTROFOTÓMETRO

Una vez pintadas las muestras, todo está listo para poder empezar a medir con el espectrofotómetro configurado como se muestra a continuación.

Lo que haremos será medir y luego transferir los datos, para lo cual, lo primero que hay que hacer, es enchufar el CM, al adaptador de corriente, o bien encenderlo si es que las pilas están cargadas. Las medidas, han sido realizadas en un papel especial y con una cartulina blanca debajo para que todos los datos estén bajo la misma superficie.

Antes de comenzar con las medidas, deberemos configurar el CM-2500d para medir las muestras con las características de iluminación, ángulo del observador, espacio de color, etc. Estos son los pasos a seguir:

1. Encender el espectrofotómetro, pulsando la rueda, y girándola podremos elegir el idioma deseado y podremos configurar también la hora y la fecha
2. Elegir el modo de medida; modo **COND**, con el cual podremos cambiar las características de observador, espacio de color mientras medimos, ya que el espectrofotómetro dispone de 6 modos de condición para configurar los parámetros como uno desee.

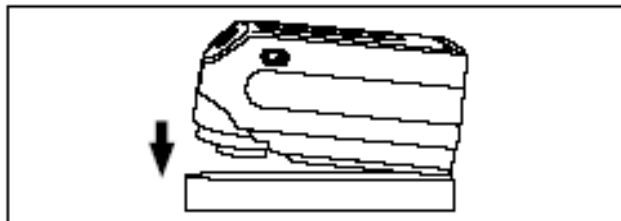


- **MASK/GLOSS:** M/SCI; área de medida (8mmØ) y componente especular (incluida)

- **UV SETTING:** UV 100%; medida realizada con todas las componentes UV que contiene la fuente de luz.
- **ILLUMINANT 1:** D65; iluminante estándar de luz de día.
- **ILLUMINANT 2:** ninguno.
- **OVSERVER:** 10°; observador estándar de 10°.
- **DISPLAY:** SPECTRO GRAPH: visualiza un grafico de reflectancia espectral.
- **COLOR SPACE:** $L^*a^*b^*$, ΔE^*
- **MANUAL AVERAGE TIMES:** 3
- **DEVIATION:** SCI; 0,20
- **AUTO AVERAGE:** 3
- **DELAY TIME:** 0,0S

3. Calibración cero y blanco:

Las calibraciones sobre el negro y el blanco, son necesarias cuando cogemos el espectrofotómetro por primera vez o cuando lo inicializamos. Antes de realizar ninguna medida, el espectrofotómetro tendrá que tener las medidas de un blanco y un negro perfecto de referencia.

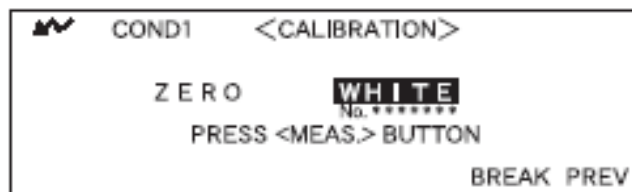


Antes de realizar las calibraciones, tendremos que tener nuestras condiciones de medida elegidas

• ZERO CALIBRATION:

Una vez completada la calibración del negro, aunque apaguemos el espectrofotómetro, los datos quedaran registrados o guardados.

El negro de referencia es una carcasa que se coloca en una base sobre la cual posamos el espectrofotómetro.



• WHITE CALIBRATION:

La calibración sobre blanco, a diferencia de la de negro, tiene que ser realizada cada vez que encendemos el espectrofotómetro.

4. Medidas:

Para comenzar con las medidas, tendremos que haber realizado la calibración sobre el blanco. A continuación, habrá que entrar en el modo BREAK como se muestra a continuación.



Habrà que fijarse que estamos en COND1, que en este caso es donde hemos configurado nuestras condiciones de medida.

Lo siguiente a realizar, será posar el espectrofotómetro sobre la muestra que se desee medir. Si fuese necesario, abriríamos la rendija para ver si tenemos la muestra bien centrada. Una vez tengamos en la pantalla la flecha de abajo, todo estará listo para medir, y solo tendremos que pulsar el botón de medida que se encuentra en un lateral del espectrofotómetro.



3.3. PARÁMETROS MEDIDOS

3.3.1. Curvas de reflectancia

La curva de reflectancia espectral de una muestra tintada, es la identificación del propio color de la muestra. Los valores de reflectancia que se han obtenido, van desde los 360nm a los 740nm y son los valores de las 12 medidas realizadas en las 4 muestras (3 medidas por muestra) que hay de cada color y grosor de capa dispuestas en columnas.

Como ya se ha comentado antes, los datos de reflectancia espectral de la muestra, se obtienen directamente de las medidas realizadas con el espectrofotómetro y el software *SpectraMagicNX*. Se pasaron los datos (las medias de los valores) a Excel, y a partir de ahí, se fueron sacando todas las graficas de reflectancia, una para cada color con los diferentes grosores de capa superpuestos en la misma gráfica, para poder observar la diferencia entre las mismas.

El tono (o luminosidad) del color, depende de la longitud de onda del pico de reflectancia máximo; que éste sea más claro o más oscuro, dependerá de la altura del pico en su longitud de onda de máxima reflectancia. Una característica importante, para poder determinar la intensidad del color, es la anchura de la banda de absorción en la mitad de altura del pico; contra más ancha sea, más intenso será el color.

Por otra parte, el perfil de la banda de reflectancia, influirá en la saturación de los colores; si el perfil es vertical, dará como resultado máximo de saturación.

3.3.2. Valores K/S con ajuste de la recta tendencia

Los valores de K/S, salen directamente del software SpectraMagicNX, sin más que aplicar la ecuación (1.13) a la curva de reflectancia.

Con esta fórmula, tendremos valores de K/S para cada longitud de onda. Lo que se pretende comprobar con estos valores, es ver la proporcionalidad entre el número de capas superpuestas frente a la concentración de tinta para unas determinadas longitudes de onda, y poder elaborar posteriormente unas formulas de predicción de color.

Con esta teoría se intentará realizar la predicción de la reflectancia espectral de cualquier mezcla conocida de colorantes. El problema inverso, es decir, saber cuál es la mezcla necesaria para obtener una reflectancia espectral determinada, es el núcleo de todos los sistemas informáticos de predicción de mezclas de colorantes.

Una vez obtenidos los gráficos de los valores de K/S para cada longitud de onda, realizaremos la evaluación de las mismas, pero lo haremos solo en algunas longitudes de onda determinadas, en las que son características del propio color que estemos analizando en cada momento. Después, se realizará un análisis de regresión lineal, que es una técnica que se utiliza para estudiar la relación entre variables, en nuestro caso, para ver como se ajustan nuestros valores de K/S (para las 6 capas de rotulador) a una línea recta (línea de tendencia).

3.3.3. $L^*a^*b^*C$ y h_{ab}

El espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ proporciona una útil representación tridimensional de los estímulos percibidos del color. Los valores de $L^*a^*b^*C$ y h_{ab} , son muy representativos en cuanto a cual ha sido el color medido.

Con estos valores podremos calcular un parámetro muy interesante, la llamada diferencia cromática. Con ella podremos obtener matemáticamente cual es la mínima diferencia perceptible por el ojo humano entre capa y capa de color.

3.3.4. ΔE^* , Diferencia de cromática

El calculo de ΔE^* nos servirá par averiguar el número de capas que el ojo humano es capaz de discriminar, es decir, cual es la muestra a partir de la cual por más que pintemos encima, el color ya no se satura más. Calcularemos pues, con los parámetros L^* , a^* y b^* la diferencia cromática entre la 1º y 2º capa, entre la 2º y 3º, 3º y 4º y así sucesivamente hasta llegar a la sexta.

3.3.5. Comparación con el Pantone más cercano. Test de Color

Para la realización de este apartado, necesitaremos las muestras pintadas sobre el papel de *Letraset*, la carta de tonos de color de Pantone *solid matte*, el colorímetro *Color Cue* y la cabina de iluminación *Macbeth Spectralight III* en modo D65, para poder

comprobar con el iluminante que mide el colorímetro, los colores más aproximados de la muestras, con los tonos Pantone.

Lo primero, fue medir las muestras de color con el colorímetro *Color Cue* de Pantone, para ver a que tono de las cartas de color de Pantone se aproxima cada muestra. Para ello, hubo que configurar el *Pantone Color Cue*, para que los resultados estuvieran acorde con el tipo de carta de color elegida, en nuestro caso, la *solid mate*, la más parecida en cuanto al brillo de las muestras de color.

Al tener 4 muestras repetidas para cada color y cada capa, se hizo una media de los valores que más repetía el *Color Cue*, debido a que éste no daba siempre el mismo resultado. Estos valores se añadieron a una tabla, par realizar un estudio posterior con observadores reales.

El siguiente paso, fue buscar a observadores, para que con las muestras de color y la carta de tonos pantone fueran mirando uno a uno el color más aproximado a la guía y comparar después los resultados obtenidos, con los predichos por el colorímetro.

En un principio, la búsqueda visual con el pantone más cercano se realizó para todas las capas y muestras, pero a la hora de reunir a gente para poder comparar luego, solo se realizó el estudio con las últimas capas (las más saturadas) debido a que se hacia bastante difícil y cansado mirar todas las capas. Además los colores más aproximados a las guías pantone son las muestras de rotulador mas saturadas.

Se realizó un estudio preliminar en el que participaron 16 observadores, los cuales miraron en todo el abanico de colores el tono más aproximado a las seis capas superpuestas de los 12 rotuladores. Una vez pasados todos los observadores, se calculó cuales eran los 3 tonos más seleccionados por los observadores y junto con el valor que daba el *Color Cue*, realizar un segundo estudio mas aproximado.

Aparte de esto, se les ha realizado un test de visión de color (Test de *Isihara*) a los diferentes observadores de este segundo estudio, para poder apreciar cuantos de ellos presentan alguna discapacidad en la visión del color.

3.4. PREDICCIÓN DE COLOR

En este apartado se utilizarán tres de los doce colores que se han usado para la realización del proyecto, debido a que las mezclas a realizar pueden ser infinitas. Los colores serán los correspondientes a las mezclas de color sustractivas, es decir, el cyan, el magenta y el amarillo.

Se describirán dos métodos para realizar la predicción de color, uno se ha realizado con el método de igualación y de color, que se explicó en la introducción en el apartado de predicción de color y otro método de predicción a partir de unas mezclas realizadas con los propios rotuladores.

Para poder realizar las predicciones de color a partir de los coeficientes k/s (absorción y dispersión) de cada tinte, lo primero que se necesita, es determinar los colores que se van a utilizar y en que longitudes de onda se van a coger dichos coeficientes. Esto se llevará a

cabo con las gráficas de reflectancia espectral de los colores cyan, magenta y amarillo y con las de la función $F(R)$ en dichas longitudes de onda.

Para el cálculo de las concentraciones de colorante (c_1 , c_2 y c_3), se emplearán tres ecuaciones simultaneas (1.23) que corresponden con los coeficientes k/s de los tres colores escogidos. Estos coeficientes, serán los correspondientes a la longitud de onda del pico de reflectancia máximo de cada uno, para el caso en el que solo se pinto una capa, pues luego ya se sacarán los valores de las concentraciones para poder reproducir el tono deseado (que será un valor de K/S para alguno de los colores ya calculados, por ejemplo un verde con tres capas).

En los cálculos, omitiremos el valor de k/s del papel, debido a que su valor ya está incluido en las medidas de reflectancia que se realizaron para cada rotulador; con lo que nuestro sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} F(R_{M\lambda}^1) &= c_1 a_{1\lambda}^1 + c_2 a_{2\lambda}^1 + c_3 a_{3\lambda}^1 \\ F(R_{M\lambda}^2) &= c_1 a_{1\lambda}^2 + c_2 a_{2\lambda}^2 + c_3 a_{3\lambda}^2 \\ F(R_{M\lambda}^3) &= c_1 a_{1\lambda}^3 + c_2 a_{2\lambda}^3 + c_3 a_{3\lambda}^3 \end{aligned} \quad (1.24)$$

- **1º método: Procedimiento para sacar las 3 concentraciones de los tres colorantes (Cc, Cm, Cy):**

Se intentará predecir la cantidad de colorante que se necesita para poder igualar un tono dado, en concreto, alguno de los tonos creados mediante la superposición de capas de rotulador. Para ello, tendremos los tres valores de k/s en las tres longitudes de onda características para cada primario sustractivo; y para la muestra a igualar, sus tres valores de K/S correspondientes a las mismas longitudes de onda, que corresponderán con los términos independientes del sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas.

Construiremos una hoja en Excel que contenga estos datos, de forma que si los cambiamos, podamos sacar las cantidades necesarias de cyan, magenta y amarillo para igualar cualquier color o cualquier muestra

El primer paso, es el de escribir las ecuaciones, para ello, haremos referencia a las ecuaciones como:

1. $c(C1, C2, C3)$
2. $m(C1, C2, C3)$
3. $y(C1, C2, C3)$

Por lo que tendremos las siguientes ecuaciones (1.24) donde se desean encontrar los valores para c_1 , c_2 y c_3 (recordamos que los subíndices 1, 2 y 3, corresponden con los colores cyan, magenta y amarillo) que causen que, $y(C1, C2, C3)$, $c(C1, C2, C3)$, $m(C1, C2, C3)$ sean igual a cero, formando la siguiente suma:

$$y = c^2 + m^2 + y^2 = 0$$

Para poder resolver nuestros sistemas de tres ecuaciones con tres incógnitas, utilizaremos la función SOLVER de Excel, con la cual hallaremos las concentraciones de colorante que son necesarias para igualar un color.

Crearemos una hoja de Excel, como la que aparece a continuación, en la que se tengan las variables CyanC1=1, MagentaC2=1 y AmarilloC3=1, como valores iniciales de las incógnitas. Para ello, escribiremos 1 en las celdas B1, B2 y B3; en B5, B6 y B7 en cambio, escribiremos las ecuaciones, para que se cumpla lo siguiente

$$F(C_{M\lambda}^1) = c_1 \cdot 0.08 + c_2 \cdot 4.82 + c_3 \cdot 0.02 = 0$$

$$F(M_{M\lambda}^2) = c_1 \cdot 0 + c_2 \cdot 0 + c_3 \cdot 2.46 = 0$$

$$F(Y_{M\lambda}^3) = c_1 \cdot 0.02 + c_2 \cdot 0.02 + c_3 \cdot 0.02 = 0$$

Microsoft Excel - Concentración				
DESVEST				
	A	B	C	D
1	CyanC1=	1		
2	MagentaC2=	1		
3	AmarilloC3=	1		
4				
5	C(C1,C2,C3)=	=0*B1+0.36*B2+2.46*B3-2.95		
6	M(C1,C2,C3)=	1.13		
7	Y(C1,C2,C3)=	3.55		
8				
9		13.90		
10				
11	G557	C847 λ1	M965 λ2	Y567 λ3
12	λ1=2.95	0	0.36	2.46
13	λ2=0.16	1.26	0.02	0.01
14	λ3=0.97	0.08	4.42	0.02
15				

Parámetros de Solver	
Celda objetivo:	\$B\$9
Valor de la celda objetivo:	<input type="radio"/> Máximo <input type="radio"/> Mínimo <input checked="" type="radio"/> Valores de: 0
Cambiando las celdas	\$B\$1:\$B\$3
Sujetas a las siguientes restricciones:	
	<input type="button" value="Agregar..."/> <input type="button" value="Cambiar..."/> <input type="button" value="Eliminar"/>
	<input type="button" value="Restablecer todo"/> <input type="button" value="Ayuda"/>
	<input type="button" value="Regolver"/> <input type="button" value="Cerrar"/>
	<input type="button" value="Opciones..."/>
	<input type="button" value="Estimar"/>

Una vez tenemos los valores de las concentraciones de los tres colorantes, y con todos los valores de k/s (en todas las longitudes de onda) de los primarios sustractivos (en la 1ª capa), procederemos a calcular la F(R) ó el valor de K/S de la muestra mediante la siguiente fórmula:

$$(K/S)_M = \Sigma(c_1 (k/s)_1 + c_2 (k/s)_2 + c_3 (k/s)_3)$$

Despejando la reflectancia (R) de la ecuación 1.13 se consigue definir la función de K-M (1.15) y con el valor K/S de la muestra que acabamos de calcular, obtendremos nuestra curva de reflectancia para la muestra en todas las longitudes de onda del espectro cromático.

Debido a que los resultados obtenidos no son valores enteros de las 3 concentraciones de colorante, no ha sido posible realizar la mezcla con las concentraciones para poder comprobar visualmente si realmente se parece a la muestra original. Pero lo que si tendremos, serán los espectros de la muestra a igualar, y de la muestra predicha, con los que calcularemos su ΔE^* .

Se ha pensado, debido a que no podemos realizar las mezclas con las concentraciones predichas de colorante, que sería interesante sacar los colores que se pueden crear a partir de los rotuladores cyan, magenta y amarillo, variando el orden de mezcla y la cantidad de colorante, es decir, la cantidad de capas.

Abordamos pues, un segundo método para la predicción del color mediante concentraciones “enteras”, es decir, para mezclas de color realizadas por capas de rotulador.

- **2º método: Colores que se pueden obtener mediante la mezcla de los primarios sustractivos:**

En este segundo método, crearemos colores a partir de los primarios sustractivos, cyan, amarillo y magenta; se irán superponiendo capas encima de capa primario, sacando diferentes colores que se presentarán más adelante.

Una vez realizadas las nuevas mezclas, estas se medirán mediante el espectrofotómetro, para sacar los valores de la curva de reflectancia espectral mediante *Spectra Magic NX* y luego comparar dicha curva, con la calculada teóricamente a partir de los coeficientes de k/s de los tintes cyan, magenta y amarillo (que se calcularon anteriormente, en las medidas realizadas a las muestras).

La reflectancia de la muestra teórica, se obtendrá con los valores de k/s de para una, dos, tres o cuatro capas, (con el nº de capas que hayamos utilizado en nuestras mezclas) con lo que se sacará el valor de K/S teórico para la mezcla que se quiera comparar, y de ahí, se sacará después la reflectancia teórica para esa muestra.

Tendremos en cuenta, que los valores de k/s que salen del *Spectra MagicNX*, son valores que están entre 0 y 5 aproximadamente, comparando con los de reflectancia que están entre 0 y 100, por lo que habrá que normalizarlos.

La formula que se utiliza para poder conseguir los diferentes valores de k/s en las diferentes longitudes de onda a partir de la reflectancia (ecuación 1.13), y para la predicción de la reflectancia, a partir de los valores de k/s que se calcularon al principio de todo, se utiliza la ecuación 1.15.

Una vez tenemos los datos de la reflectancia para todas las longitudes de onda, multiplicaremos cada valor por 100, para obtener nuestra curva en su rango original.

Tendremos que tener en cuenta, que la predicción de la curva de reflectancia para las mezclas, a partir de los valores k/s , podrá realizarse de 2 maneras:

1. Multiplicando el número de capas de cada color que lleva la mezcla * el k/s de los primarios para una capa.
2. Cogiendo el valor de k/s de los primarios, para una, dos, tres o cuatro capas superpuestas.

En un estudio previamente realizado para ver que aproximación es mejor, se ha comprobado que la predicción mejora utilizando el segundo método; debido a que sabemos que el valor de K/S en función de la concentración de un colorante es lineal hasta la cuarta capa, por ello hemos supuesto y comprobado que los valores de reflectancia predichos, son mejores en este segundo caso.

Una vez tenemos las 2 curvas de reflectancia, si estas son muy similares, se sacarán las coordenadas L^* , a^* , b^* y el valor de ΔE^* par ver que diferencia existe entre ambas.

Para sacar los valores de L^* a^* b^* se necesitarán los valores triestímulo, el iluminante estándar y las funciones del observador estándar, todo esto en cada longitud de onda, debido a que no se pueden pegar los datos de la reflectancia predicha en el Spectra Magic; de ahí obtenemos los valores L^* a^* b^* de la reflectancia medida.

Con los datos y las formulas que se muestran a continuación, se ha conseguido calcular los valores de $L^*a^*b^*$ para la muestra predicha:

Lo primero de todo, fue localizar los valores del iluminante D65 ($E(\lambda)$) y las funciones del observador estándar de 10° ($x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$), junto con los datos de la reflectancia predicha anteriormente para poder calcular con las formulas que se presentan a continuación (después de la tabla) los valores triestímulo.

Con los valores triestímulos, las fórmulas de las coordenadas $L^*a^*b^*$ y los obtenidos en el libro de la CIE (Comisión Internationale de l'Eclairage), conseguimos los valores de Luminosidad, tono rojo-verde y amarillo-azul.

X_n	94.8110
Y_n	100.0000
Z_n	107.3045

Con las coordenadas de color que hemos sacado de las muestras medidas y de las predichas, calculamos la diferencia cromática entre ambas para ver la diferencia.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

4. ANALISIS Y RESULTADOS

En este apartado del proyecto se evaluarán los datos y los resultados obtenidos tras las medidas realizadas con el espectrofotómetro 2500d de Konika-Minolta, valores de reflectancia, los valores de K/S, $L^*a^*b^*$, diferencias cromáticas, etc.

4.1. ESTUDIO PRELIMINAR

Antes de empezar a dibujar las muestras con todos los colores, se realizó un estudio previo para poder determinar el número de muestras que se iban a pintar y de qué manera, para después realizar algunas medidas y ver que valores tomaban las muestras. Se realizaron unas muestras en papel A3 de *Letraset*.

Se comenzó pintando en horizontal, dibujando cuatro líneas (con la punta más gruesa, la *chisel*), una debajo de otra para que a la hora de medir con el espectrofotómetro cupiese la muestra en la abertura de éste (8mm). Había que conseguir que las líneas se solapasen justo una detrás de la otra, para intentar que no quedase mucho blanco entre ellas, o que no se solapasen demasiado. Para solucionar este inconveniente, al final decidimos que las muestras se repetirían cuatro veces para poder realizar más medidas y quedarnos con la media de estas.

La segunda muestra, que contiene 2 capas, se pintó de la misma manera que se pintó la primera, pero con el incremento de una segunda pasada (capa) a la muestra anterior, obteniendo así una muestra mas oscura. Este proceso se repitió hasta que la superposición de las capas llegaba a 6 (debido a que a simple vista, el color ya no se saturaba más)

Otra apreciación, fue que no se iban a dejar secar las capas entre la superposición de las mismas, debido a que si no, la muestra quedaba menos uniforme.

4.2. MUESTRAS Y MEDIDAS

Para comenzar con las medidas, lo primero que hay que hacer es crear las muestras. Para ello se utilizaron unas hojas especiales de la marca *Letraset*, en formato DIN A4. Se utilizó una hoja para cada rotulador, haciendo cuatro repeticiones por cada número de capa. Lo que tenemos en cada folio, es una matriz de 4 filas por n columnas, donde n es el número de capas superpuestas de rotulador, en este caso $n = 6$ debido al estudio previo realizado.

Se realizarán tres medidas por cada muestra de color, obteniendo así 12 medidas por cada capa de color. Con estas 12 medidas se obtendrán las medias y las desviaciones estándar de cada capa de color, obteniendo así unos datos mucho más fiables debido a que a la hora de haber pintado las muestras, puede que no hayan salido todas perfectas.

4.3. PARÁMETROS MEDIDOS

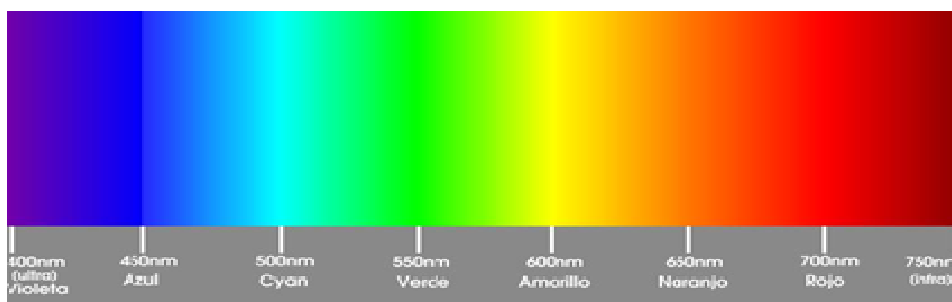
Una vez realizadas las muestras y las medidas, pasamos al análisis de los diferentes parámetros y gráficos.

4.3.1. Curvas de reflectancia espectral y muestras

Para observar el propio color de la muestra, analizaremos las graficas de reflectancia de los doce colores que hemos empleado para la realización de este estudio.

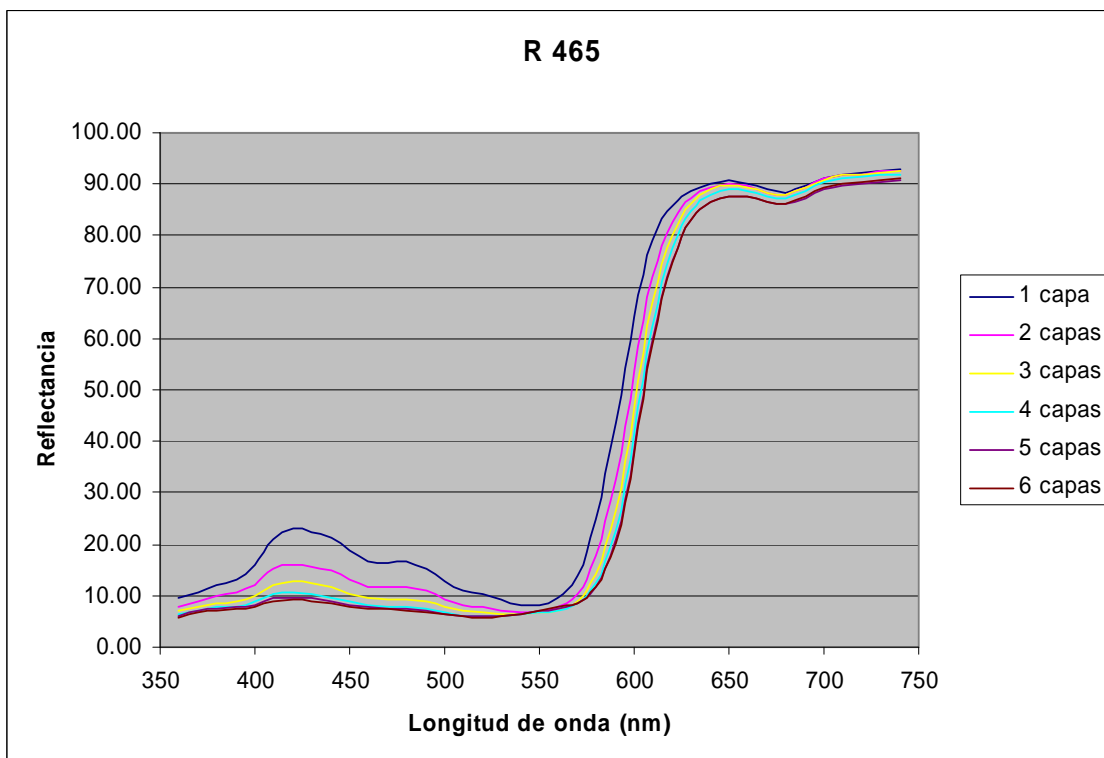
La curva de reflectancia espectral de una muestra tintada, es una identificación de su color. Si la curva de reflectancia fuese igual para alguna de las diferentes muestras, entonces tendríamos dos muestras del mismo color.

En la figura de abajo, tenemos el rango del espectro visible, para recordar que colores están asociados con las diferentes longitudes de onda.

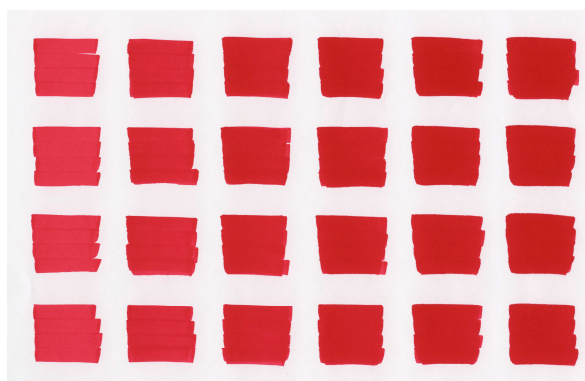


En las siguientes páginas, se presentan las diferentes gráficas de las reflectancias de los doce colores con sus respectivas muestras de color. Debajo de cada una de ellas, se hará un breve comentario de las características de cada color y se elegirán ciertas longitudes de onda, las cuales son características para cada color, ya sea por estar en el máximo de reflectancia de algún lóbulo, o por tener algún mínimo o decremento de la misma en alguna zona del espectro.

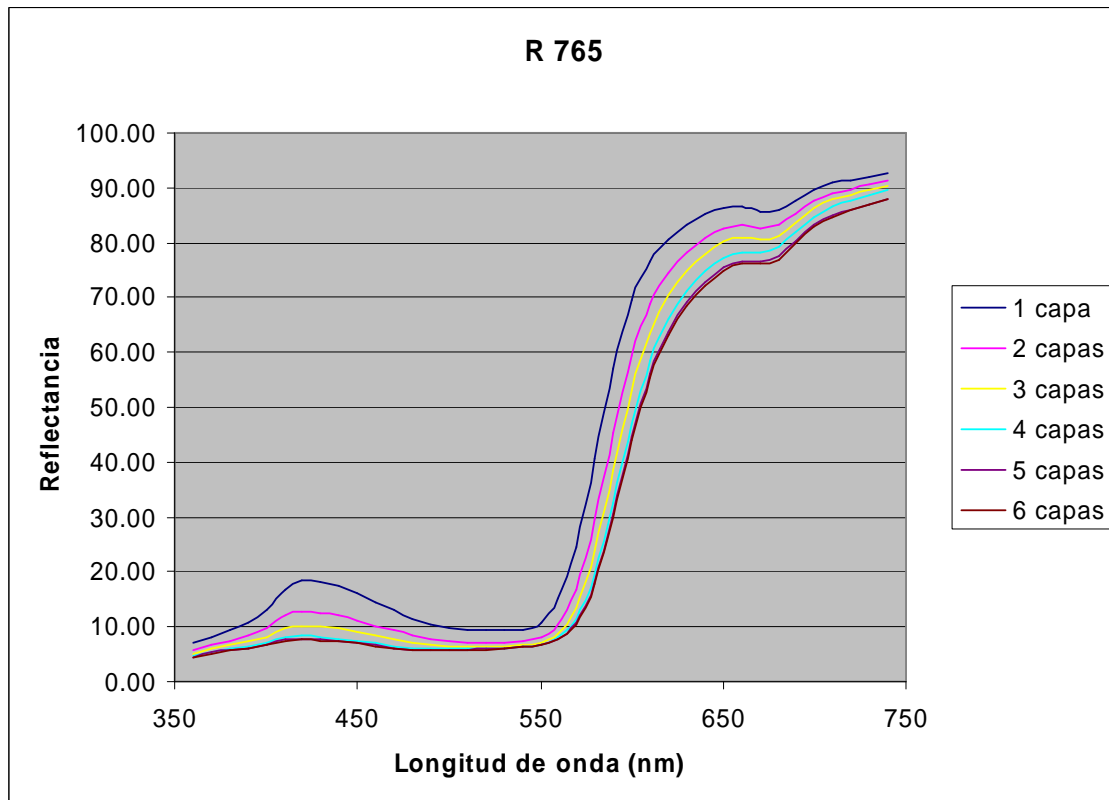
- **Red 465:**



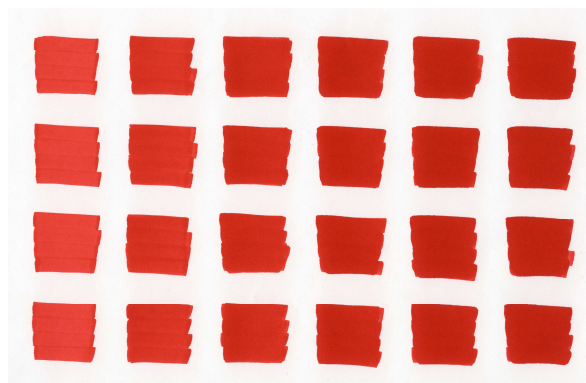
- El rojo, es el color que se corresponde con la frecuencia más baja de luz discernible por el ojo humano y se sitúa justo antes que las ondas infrarrojas. La longitud de onda del color rojo se sitúa alrededor de los 700nm.
- El color de la muestra es rojo, pero más arrosado que el de la siguiente hoja. Si observamos la curva de la reflectancia, vemos que el lóbulo que se sitúa entre 400 y 450nm (zona correspondiente a los violetas), es mayor que en el del siguiente rotulador (siguiente página). Al reflejar longitudes de onda del rango de los violetas y rojos, el color correspondiente es una mezcla (en proporción a la reflectancia) entre ambas.
- Las longitudes de onda elegidas como zonas características del color son las siguientes: 420nm, debido al lóbulo existente en la zona de los violetas, 650nm, máximo de reflectancia, 680nm, decremento en la curva y 740nm (donde el color se encuentra saturado para todas las capas).



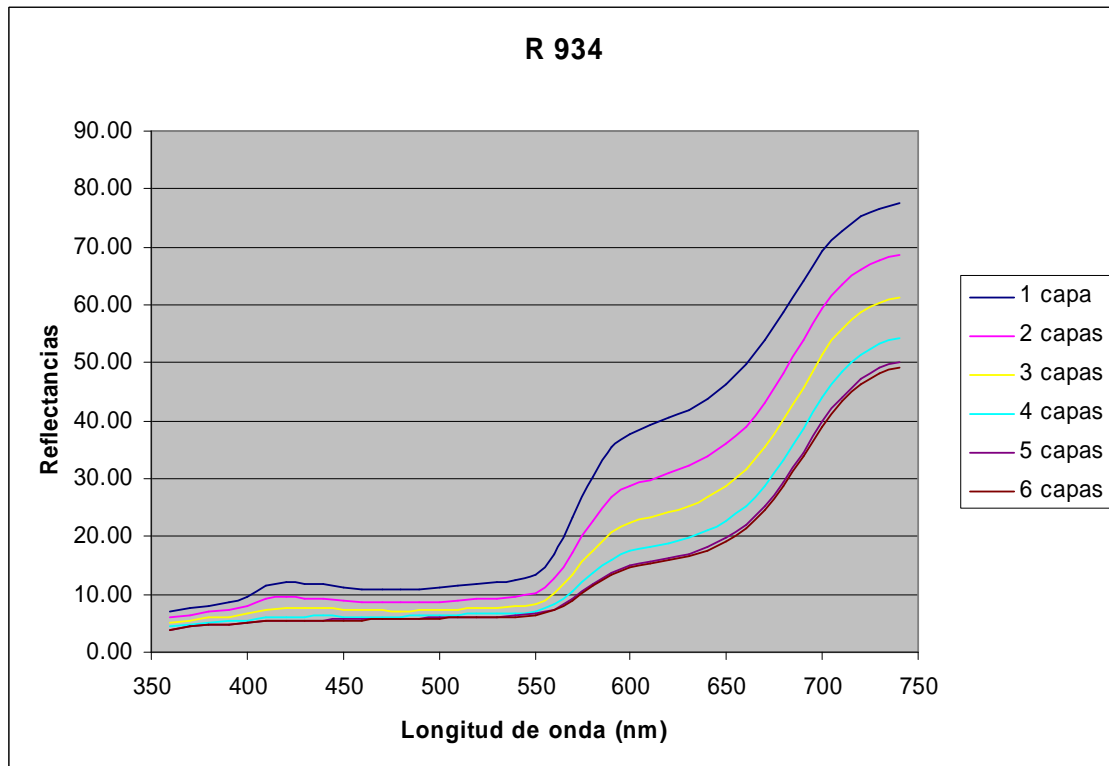
- **Red 765:**



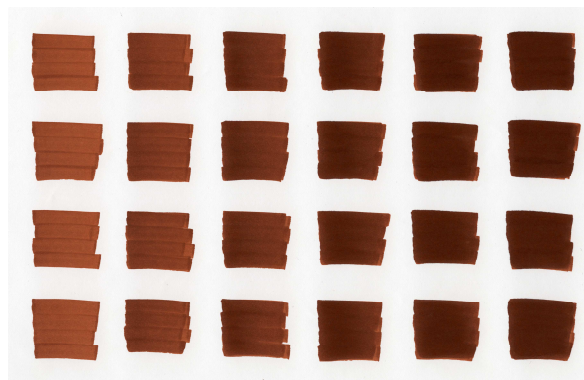
- El color de esta gráfica, también es rojo, pero más puro que el anterior. Podemos observar que a diferencia del color anterior, el lóbulo que tiene en los violetas, solo presenta un pico a 420nm
- Se observa que la curva empieza a crecer a partir de los 570nm hasta los 650, donde decrece en 680 y vuelve a crecer. La diferencia de reflectancia entre capas en la subida, es mayor que en el caso anterior. Cuando la diferencia de reflectancia entre capas está bien diferenciada, es porque nos encontramos ante las zonas de mayor importancia del color que estamos analizando
- Sus longitudes de onda características son: 420nm, 560nm, y 660nm.



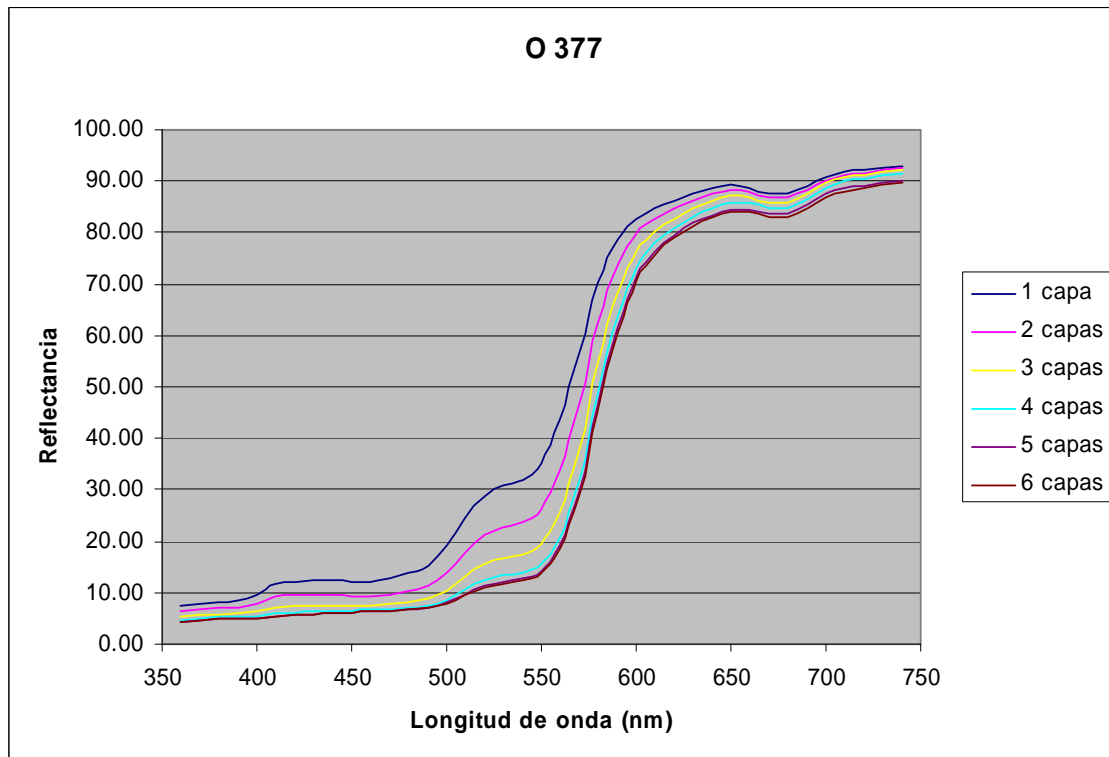
- **Red 934:**



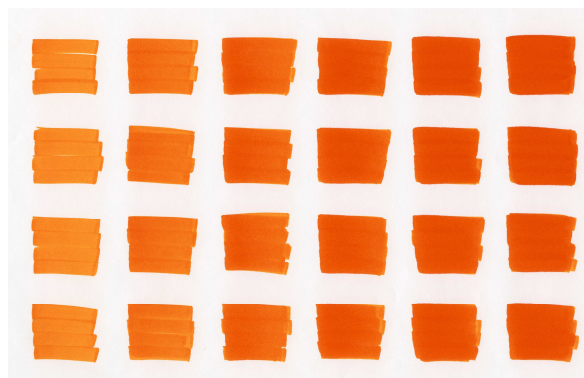
- El color marrón como tal es una mezcla en la que predominan el rojo y el verde, pudiendo obtenerse por desaturación del naranja o por mezcla de este color con el negro.
- La curva de este marrón, es bastante plana hasta que llega a los 550nm, que empieza a crecer. Esto es debido a que no contiene nada de azul, y va creciendo por los verdes hasta alcanzar máximo en los rojos. De hecho la diferenciación de la reflectancia entre capas aumenta considerablemente a partir de los 560nm.
- Sus longitudes de onda características son: 550nm, 600nm y 740nm.



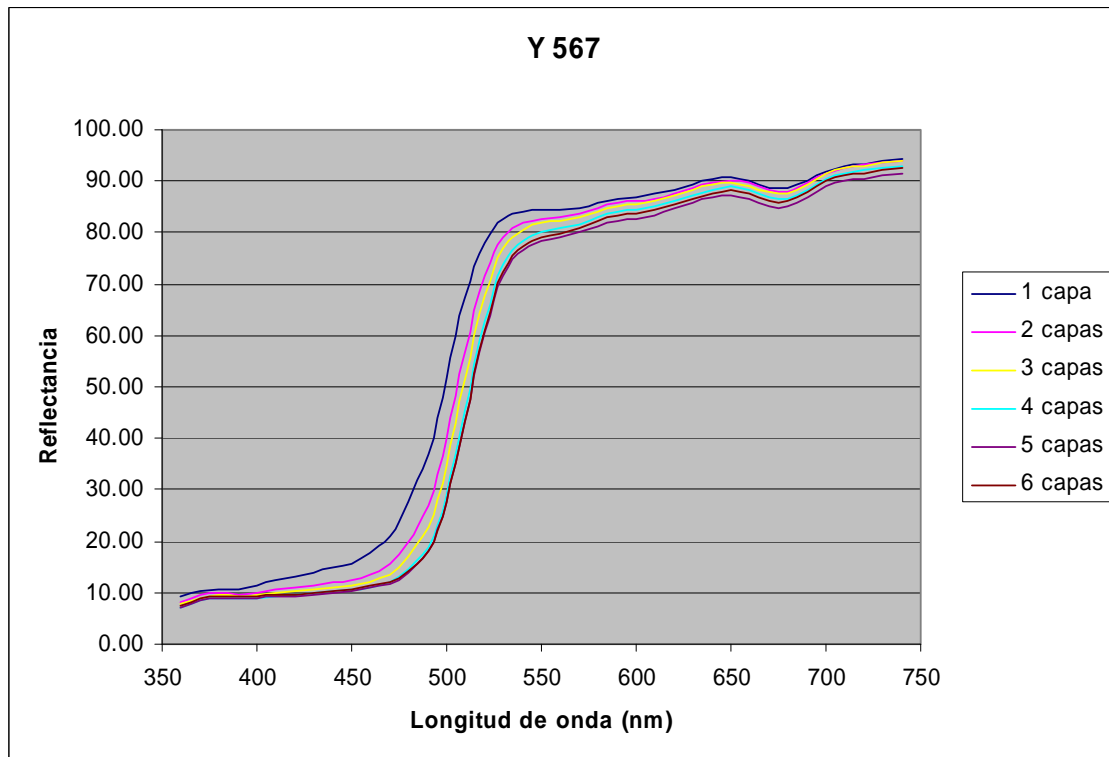
- **Orange 377:**



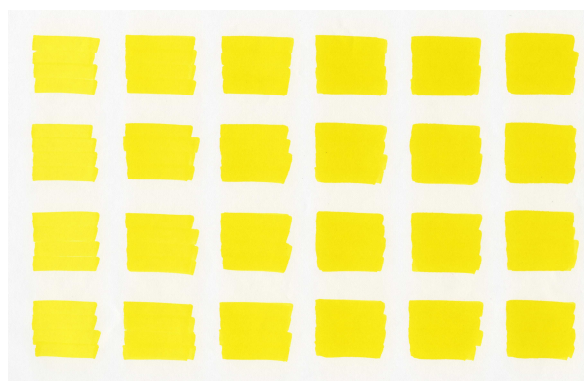
- Para mezclas sustractivas, se puede obtener el naranja a partir de la mezcla de magenta y el amarillo en una proporción mayor de éste último. El color naranja se encuentra entre el rojo y el amarillo del espectro visible.
- En 650nm y 740nm están los máximos del naranja. La curva empieza a crecer a partir de los 550nm.
- Las longitudes de onda características son: 520nm, 650nm, 680nm y 740nm.



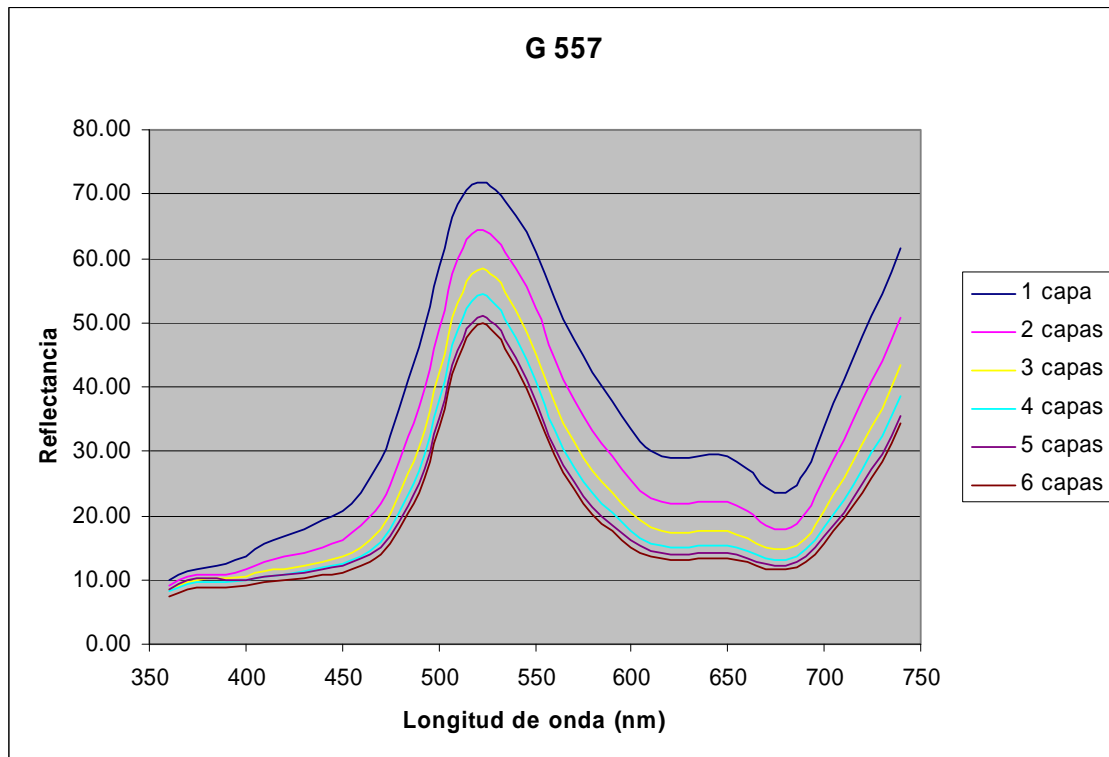
- **Yellow 567:**



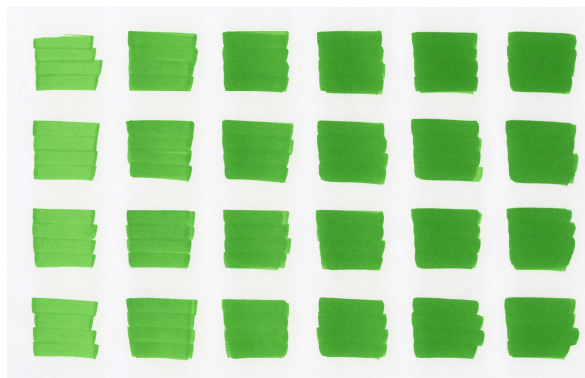
- El **amarillo** es el color de la luz cuyo rango se encuentra entre 565nm y 580nm. La mezcla entre la luz de color roja y verde es captada por el ojo humano como amarillo.
- En este caso, el amarillo crece desde los 470nm hasta los 550nm, a partir de los cuales la reflectancia sigue aumentando, pero de una manera más lenta. Podemos observar que la diferencia de reflectancia entre capas no es demasiado grande, esto es debido que el amarillo es un color que se satura pronto.
- Sus longitudes de onda características son: 530nm, 660nm y 680nm.



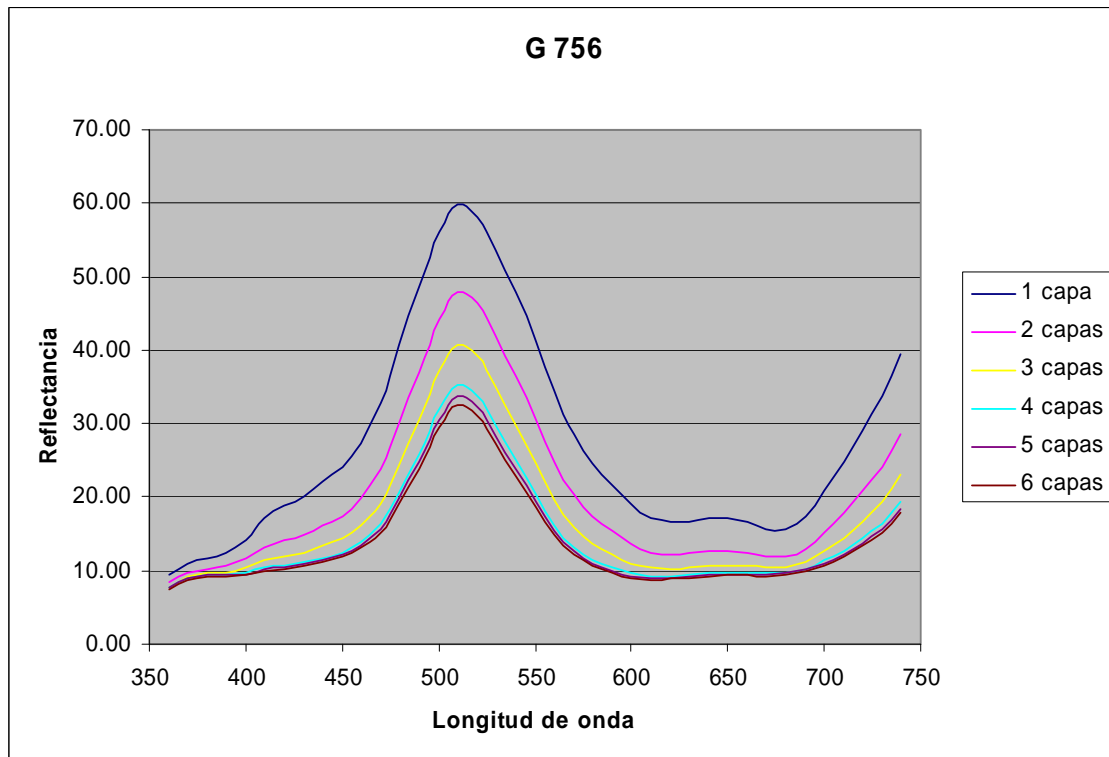
- **Green 557:**



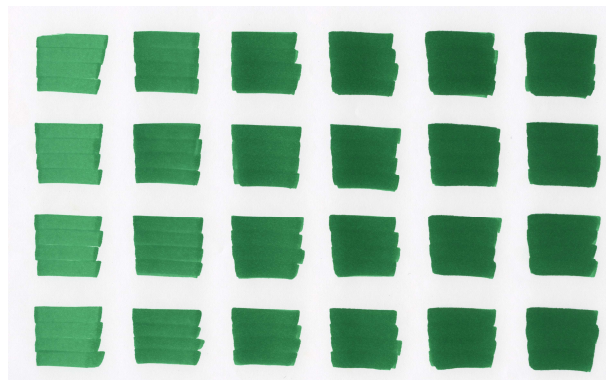
- El **verde** es un color frecuente en la naturaleza. Las plantas son verdes porque contienen clorofila. Mezclando pigmentos de colores azul y amarillo, se crea este color. La luz verde tiene una longitud de onda de unos 550nm. Es complementario al magenta.
- El pico máximo de reflectancia, se sitúa en torno a los 520nm, y decrece hasta los 680 donde hay un mínimo, y a partir del cual empieza a crecer de nuevo.
- Las longitudes de onda características son: 520nm, 650nm y 740nm.



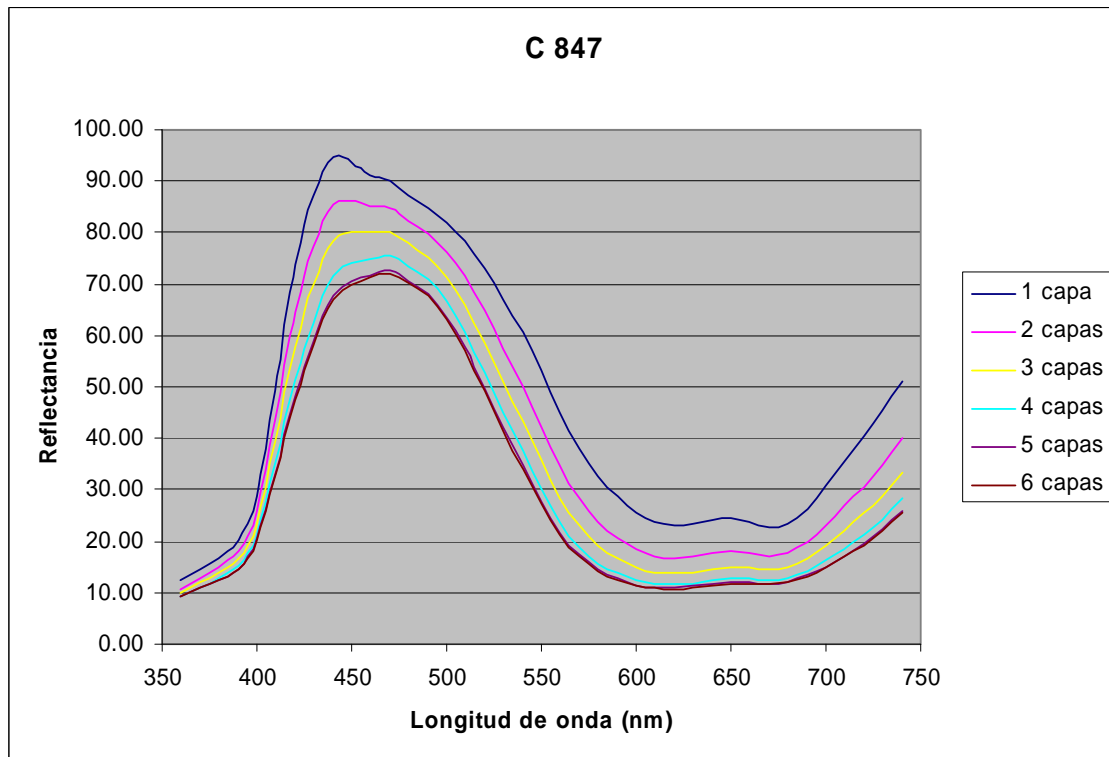
- **Green 756:**



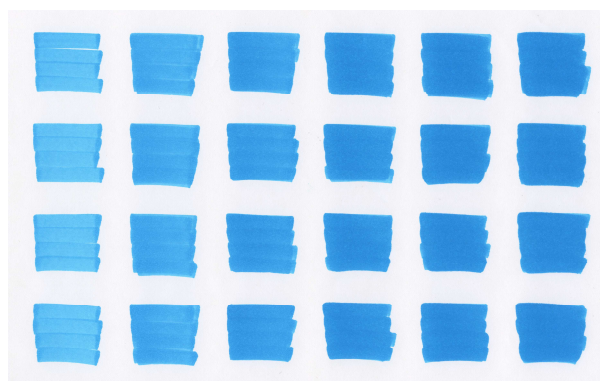
- Este otro verde, al ser más oscuro que el anterior, tiene el pico máximo a 510nm y su distribución es más gaussiana que la anterior, es decir, que tiene el lóbulo mejor definido y centrado que el verde anterior.
- Como el verde es uno de los colores que tiene su pico de máxima reflectancia bien definido, se puede observar bastante bien, como la diferencia de reflectancia entre capas es en esa zona es mayor.
- Las longitud de onda característica se encuentra en 510nm, 650nm y 680nm y 740nm.



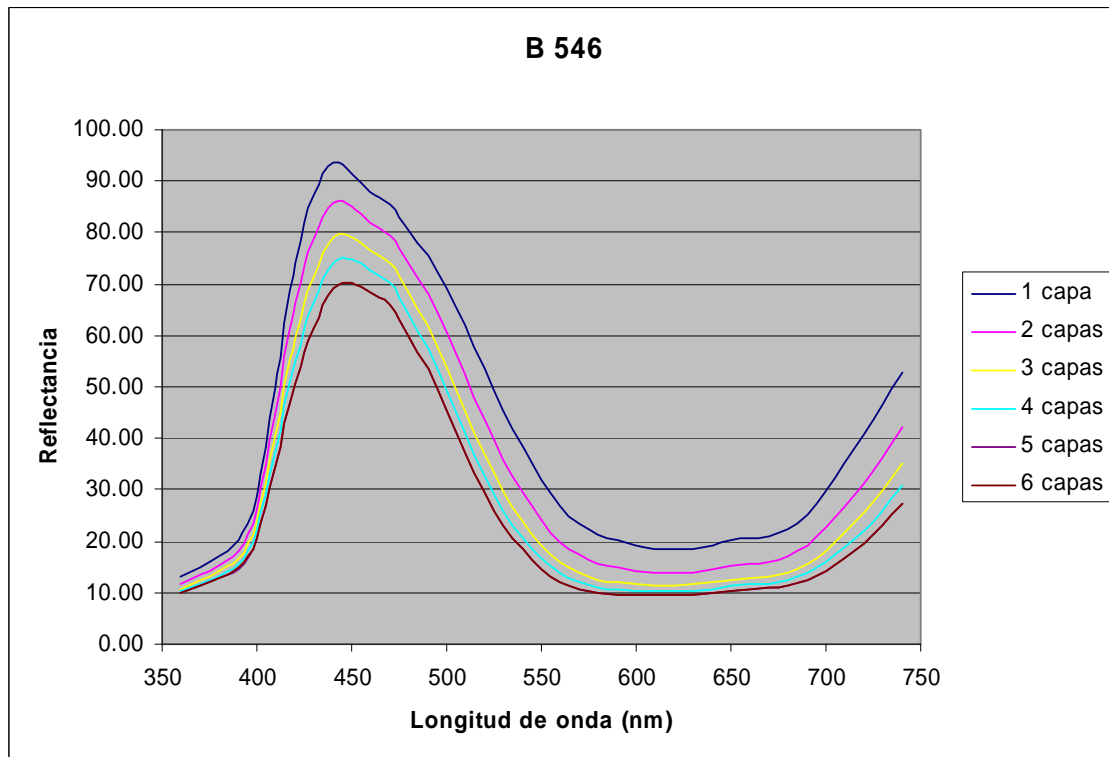
- **Cyan 847:**



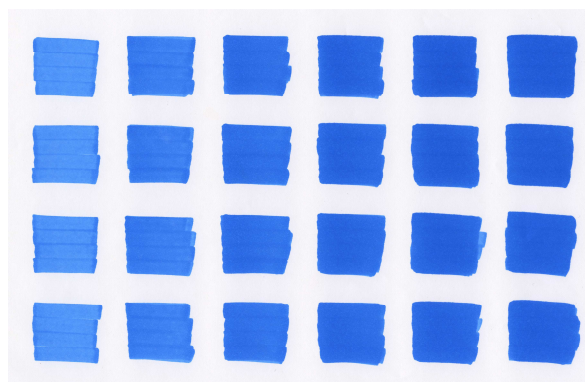
- El cian, también escrito cyan, es uno de los 3 primarios sustractivos junto con el amarillo y magenta. Su tonalidad es azul claro y su longitud de onda varía desde 487 hasta 505 nm.
- El cyan, también tiene un pico de reflectancia máxima, a 460nm. Se observa, que a medida que aumenta el número de capas, el pico máximo se desplaza hacia los verdes, es decir, hacia longitudes de onda superiores.
- Las longitudes de onda características son: 440nm, 460nm y 650nm.



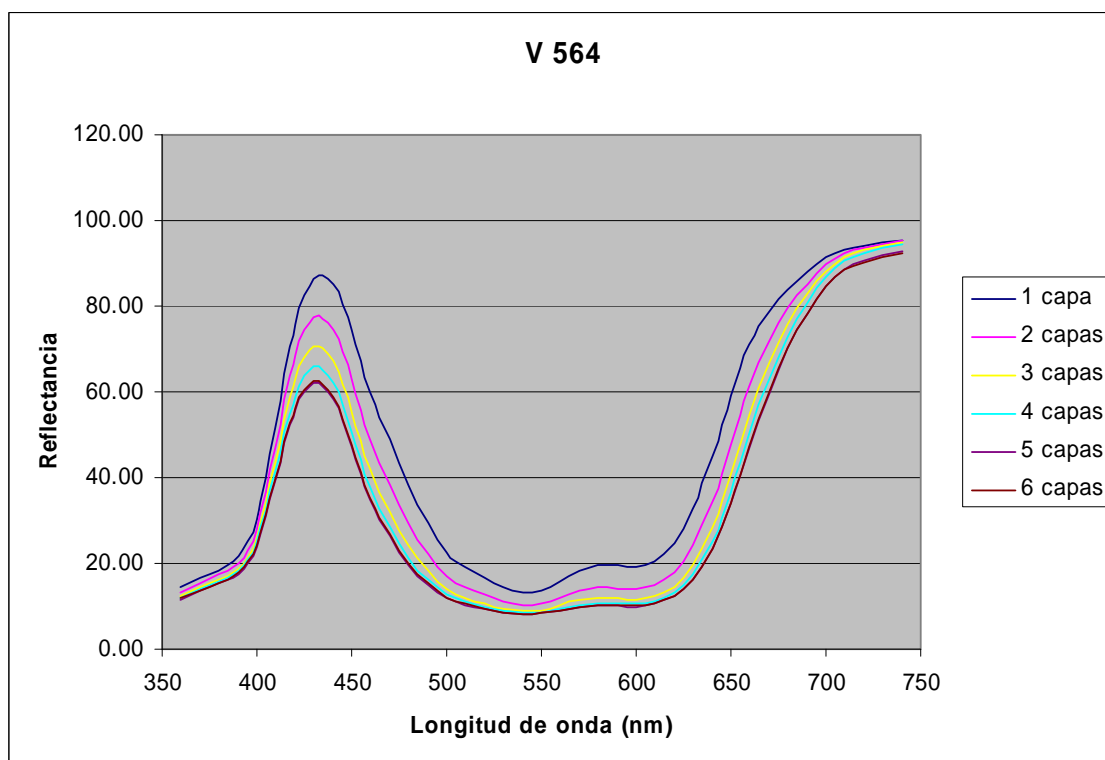
- **Blue 546:**



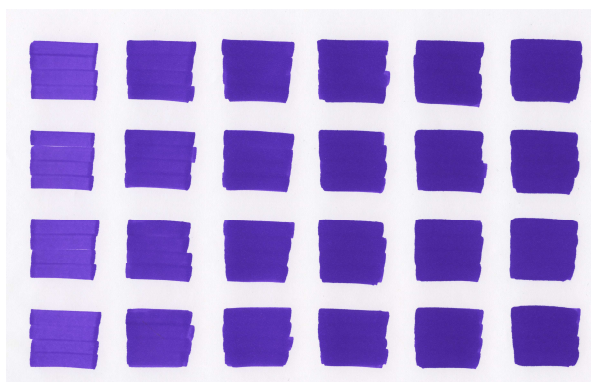
- El color azul es uno de los primarios aditivos. Es complementario al amarillo en la luz, ya que para formar amarillo se necesita mezclar rojo y verde al 100% de intensidad, y nada de azul. La luz azul tiene una longitud de onda de alrededor de 470-450nm.
- La curva de este azul, es parecido a la del cyan, con la diferencia de que la máxima reflectancia se encuentra un poco antes, a 440nm. Se observa que a medida que se incrementa el número de capas, el pico tiende a desplazarse hacia los verdes.
- Las longitudes de onda características son: 450nm, 620nm y 650nm.



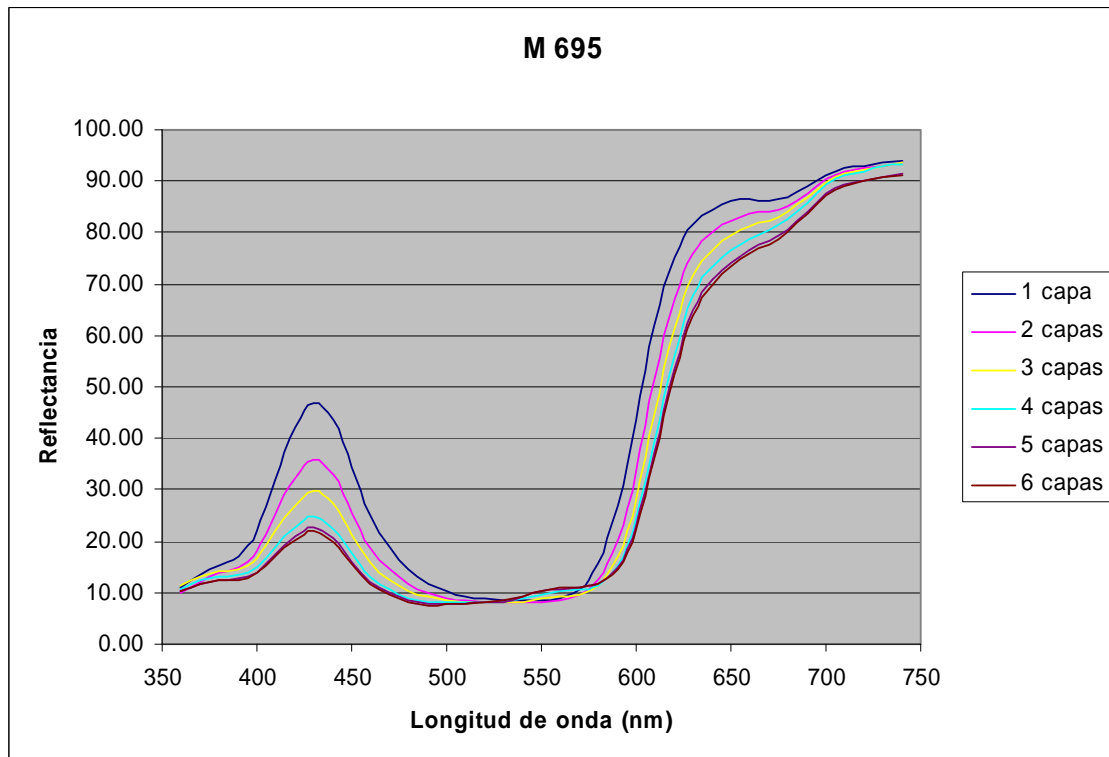
- **Violet 564:**



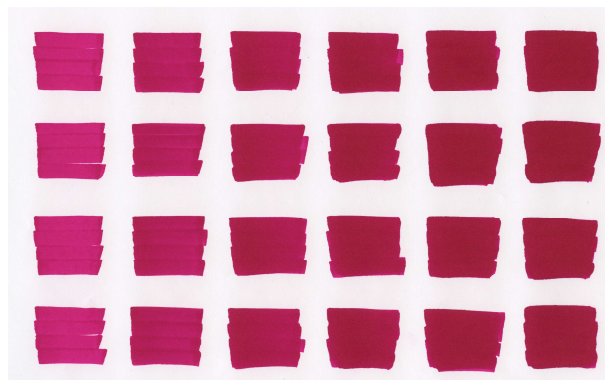
- El color **violeta**, se crea a partir del conjunto de colores azules, rojizos. En particular, se refiere al color de la luz de menor longitud de onda que se encuentra al final del espectro visible. Su longitud de onda se encuentra entre los 420 y los 380nm.
- El violeta de este rotulador, tiene el pico máximo de absorción a 430nm y su campana de gauss tiene mayor pendiente que la de los verdes y azules, debido a que el color violeta se ciñe más a los azules, que a los cianes y verdes. A partir de 580nm la curva vuelve a crecer.
- Sus longitudes de onda características son: 430nm, 580nm y 740nm.



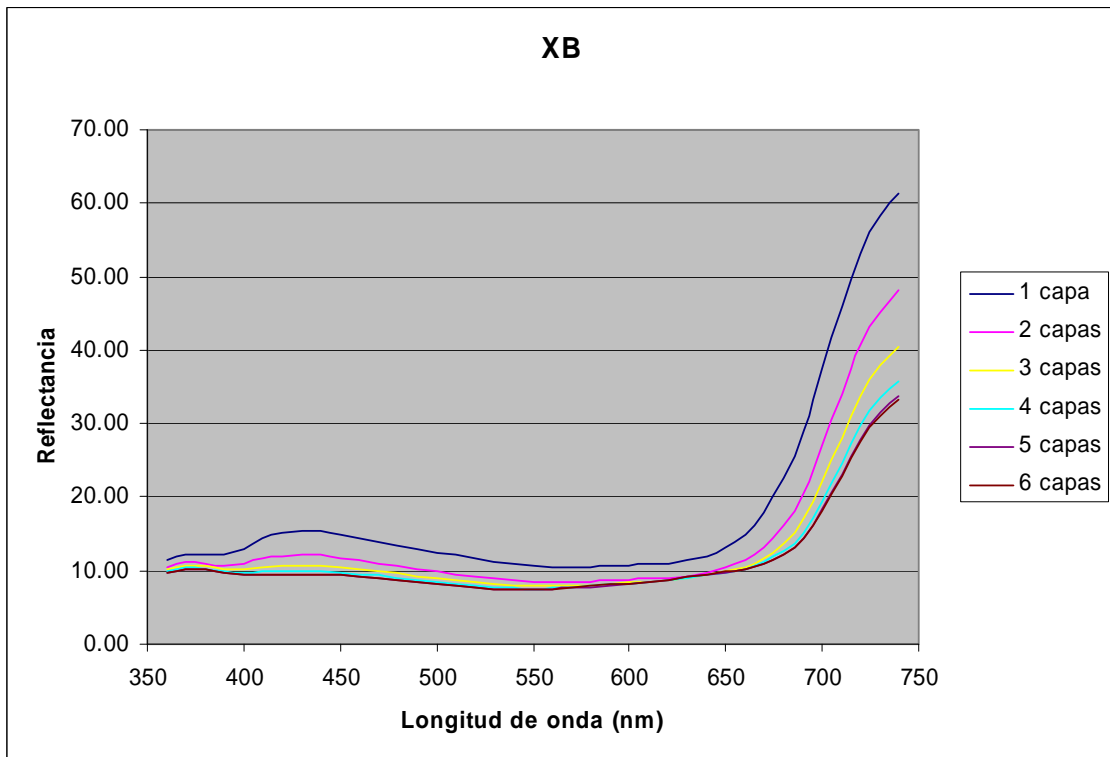
- **Magent 695:**



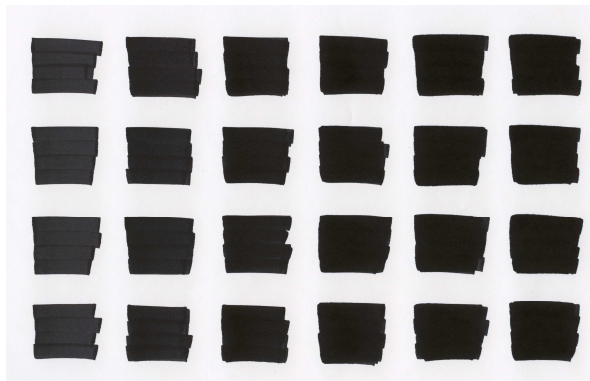
- El **magenta** es un color que se asemeja al fucsia, aunque es más intenso y tira hacia el violeta. El magenta aparece cuando los conos sensibles a las longitudes de onda largas y cortas se excitan a la vez.
- El magenta contiene todas las radiaciones (rojas y azules) menos las del verde. Por lo que puede ser definido como el "no verde" o negativo del verde.
- En 430nm se encuentra su pico de reflectancia, y a partir de 570, la curva crece hasta los 740nm. Alrededor de los 530nm se encuentra el mínimo.
- Las longitudes de onda características son: 430nm, 530nm y 650nm.



- **Black XB:**



- El color negro viene definido por la ausencia de luz y color, y aunque casi todos los colores al quitarles brillo, tono o saturación van acercándose al negro. Las superficies de color negro son aquellas que absorben todas las longitudes de onda de la luz solar, por lo que no reflejan ninguna radiación visible.
- Observamos que la curva de reflectancia espectral es plana (debido a que el negro absorbe por igual en todas las frecuencias), exceptuando en las longitudes de onda superiores, donde la curva empieza a crecer.
- Las longitudes de onda características son: 420, 660, 740nm.



Evaluación general:

Lo primero que se observa, es que la reflectancia disminuye en todo el espectro visible a mayor número de capas, es decir, al aumentar la concentración de colorante la reflectancia disminuye. Esto es debido a que al ser el grosor de la superficie (de las capas) mayor, ésta absorbe más luz, reflejando menos.

Debido a que las mezclas sustractivas complejas quitan luz a causa de la absorción selectiva (y también la dispersión), las regiones de longitud de onda con reflectancia mínima, son moduladas debido a la variación en la cantidad de colorante [6].

Se observa claramente en las diferentes curvas, que el factor de reflectancia no corresponde con un sistema lineal. A bajas y altas longitudes de onda, las líneas de reflectancia se superponen bastante, pero en las longitudes de onda características de cada color en cambio, si que existe diferencia una mayor diferencia en el valor de reflectancia entre capa y capa.

Los verdes y azules son los colores en cuyo espectro encontramos lóbulos de reflectancia bien definidos. En el violeta y en magenta también, pero con la diferencia de que a partir de los 600nm, la curva empieza a crecer, hasta alcanzar su máximo a 740nm. Cuando la aumentamos el número de capas, los picos de reflectancia máxima, se desplazan hacia longitudes de onda superiores.

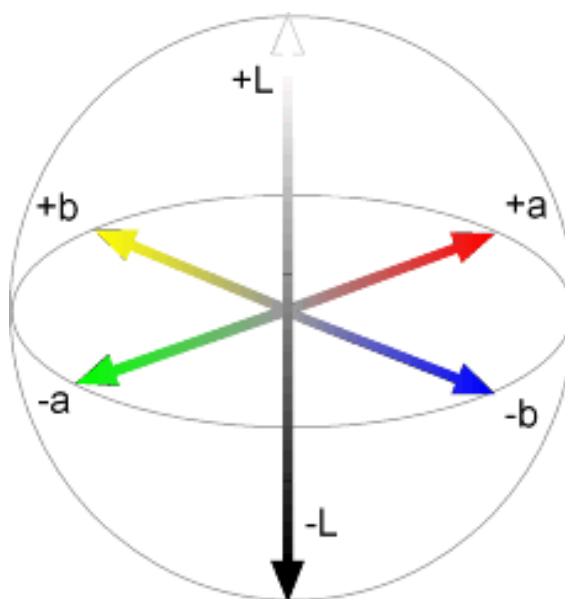
Los rojos, naranjas y amarillos en cambio, tienen una curva de reflectancia con una pendiente que crece positivamente hacia longitudes de onda largas, las correspondientes a la parte de estos colores en el espectro visible.

El color negro, debería de tener una curva plana (si fuese un negro perfecto), y sin embargo, la que tenemos, empieza a crecer a partir de los 650nm.

4.3.2. Valores $L^*a^*b^*$ y ΔE^* :

Además de obtenerse una medida más objetiva de las muestras de las capas de rotulador en papel, otra de las ventajas del sistema CIEL $^*a^*b^*$, radica en la posibilidad de calcular a partir de los parámetros L $^*a^*b^*$ la llamada **diferencia de color CIEL $^*a^*b^*$ (ΔE^*)**.

Pero antes de realizar el calculo de dicha distancia, analizaremos por separado la luminosidad de cada color y los valores de a^* y b^* que presentan dichos colores.



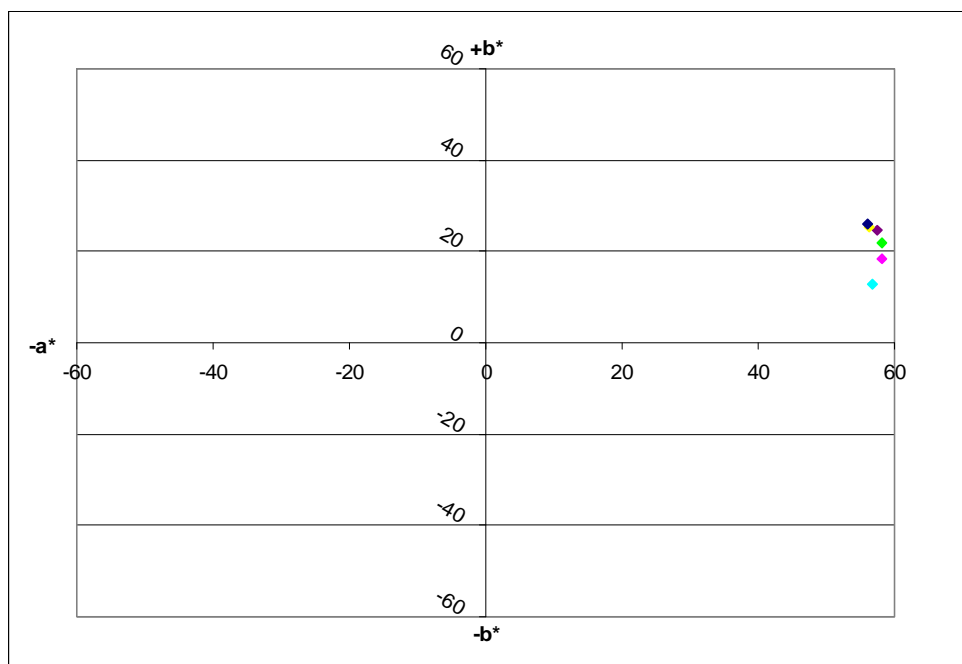
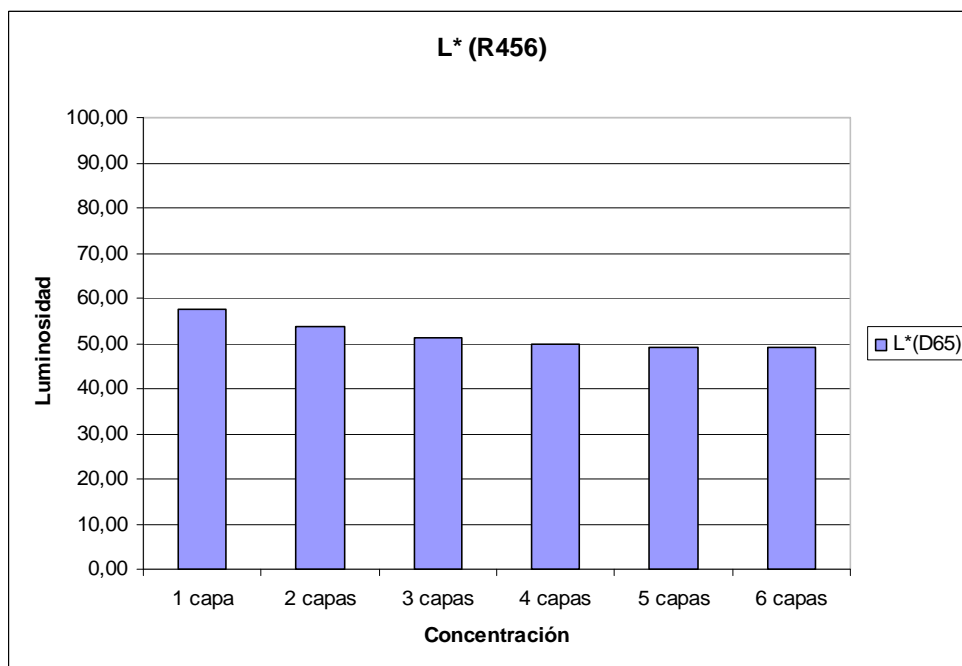
En primer lugar, se presentará una tabla, con los valores de L * , a^* y b^* y ΔE^* para cada color y n $^{\circ}$ de capas; a continuación se mostraran, las gráficas de la luminosidad de cada color en función de la concentración de colorante y por ultimo las gráficas de L $^*a^*b^*$ que como se observa en la imagen de arriba, el eje de la a^* , corresponde a las tonalidades verde-rojo y la b^* a las tonalidades amarillo-azul.

En las siguientes páginas, aparecerán las gráficas de los valores de a^* y b^* ; se obtendrán seis puntos, los cuales corresponden uno a cada valor de a^* , b^* para cada número de capa. Las especificaciones sobre el número de capa que corresponde con cada punto coloreado, es el siguiente:

1. Capa → Cyan
2. Capa → Fucsia
3. Capa → Verde
4. Capa → Violeta
5. Capa → Amarillo
6. Capa → Azul

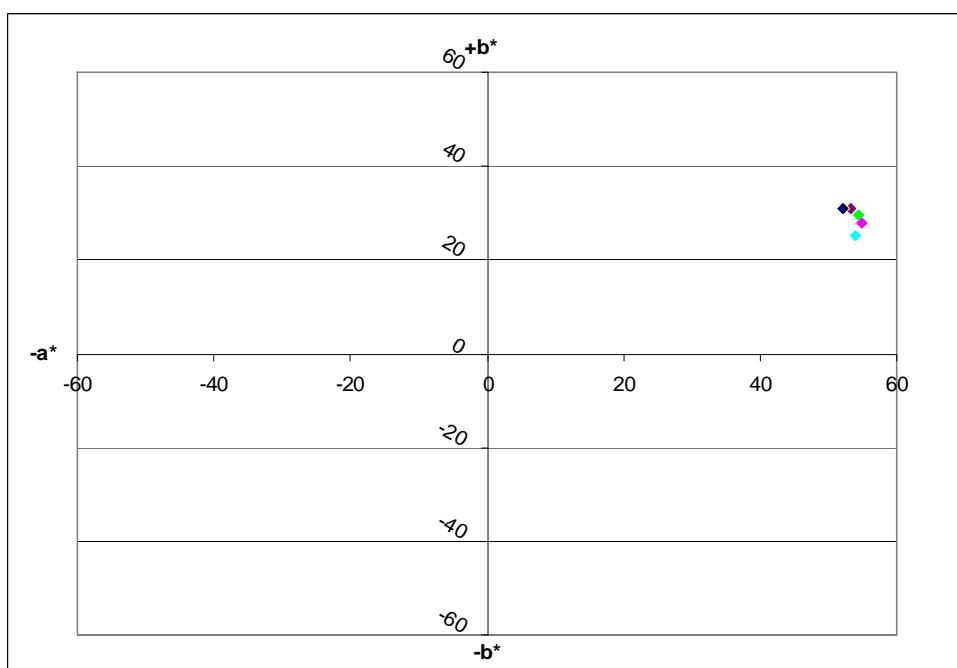
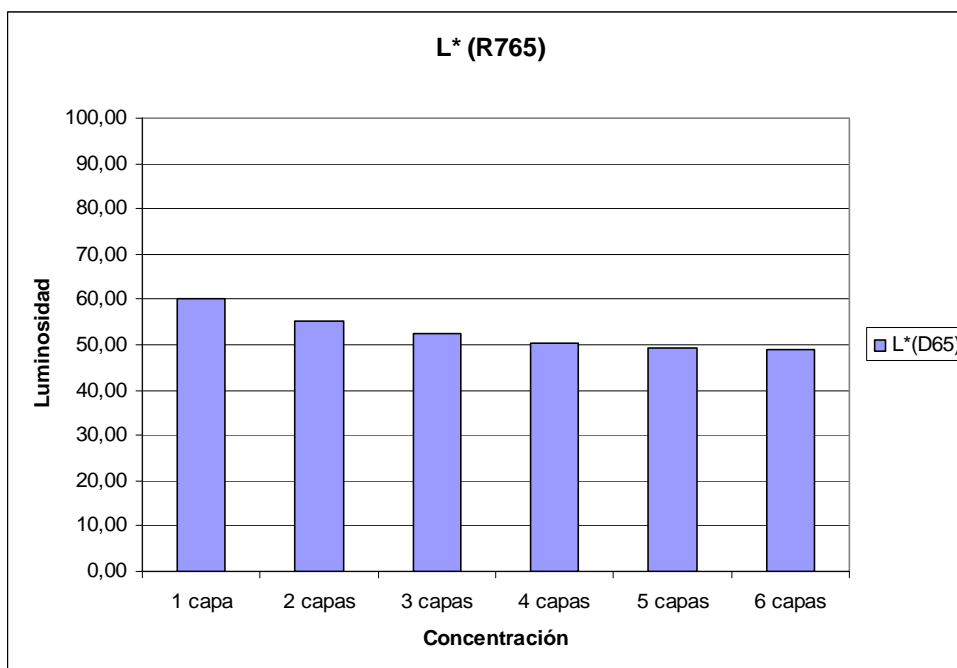
- R465

Color	Nº capas	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	ΔE^*
R465	1 capa	57,69	56,77	12,68	
R465	2 capas	53,65	58,12	18,43	7,16
R465	3 capas	51,38	58,13	21,99	4,22
R465	4 capas	49,86	57,46	24,46	2,98
R465	5 capas	49,15	56,24	25,21	1,59
R465	6 capas	48,96	56,09	26,13	0,95



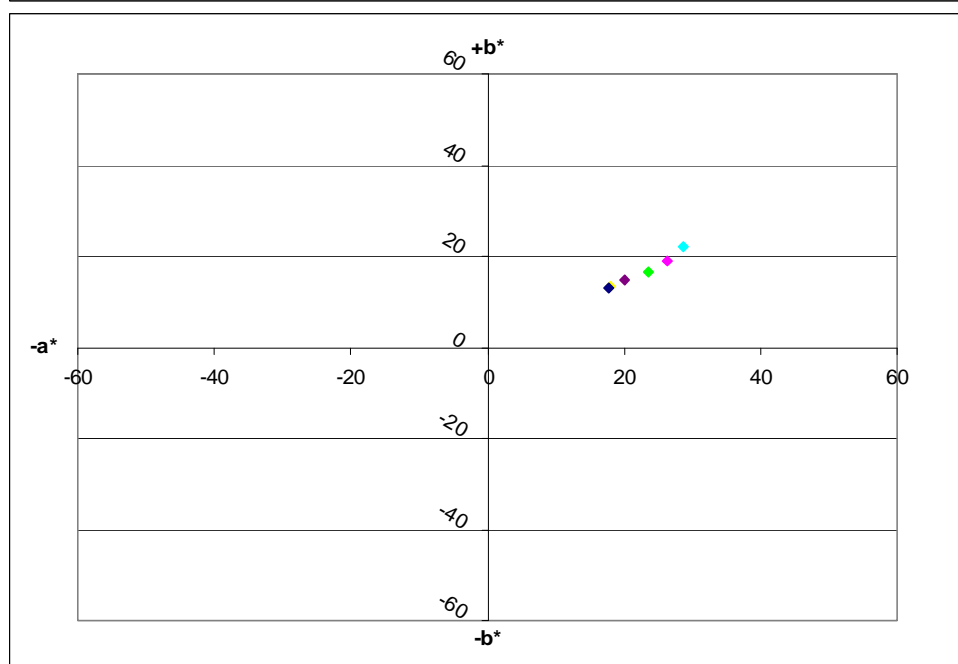
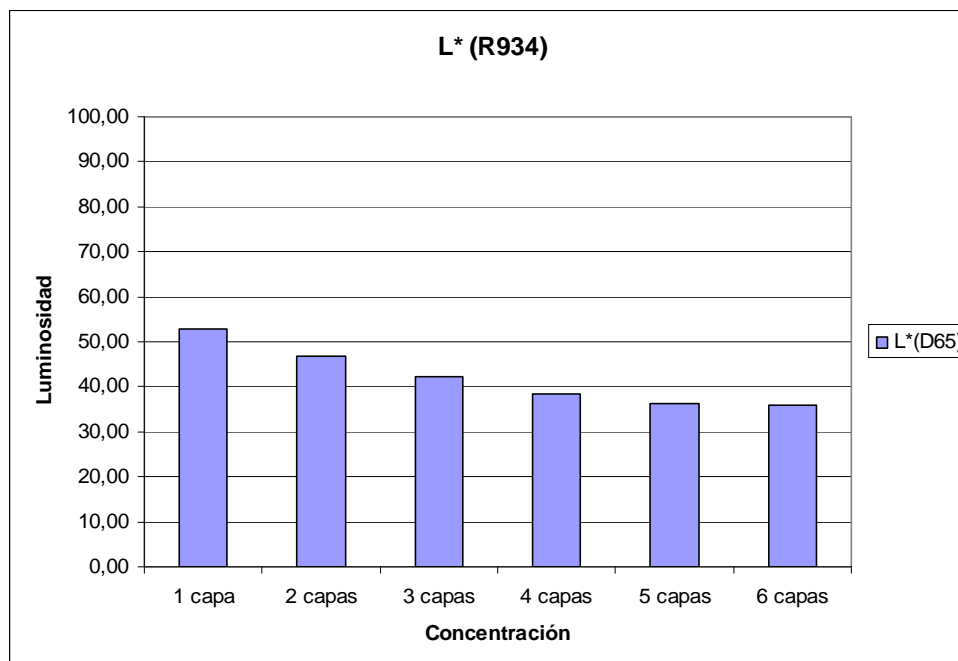
- R765

Color	Nº capas	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	ΔE^*
R765	1 capa	60,09	53,94	25,10	
R765	2 capas	55,26	54,82	27,98	5,70
R765	3 capas	52,59	54,35	29,62	3,16
R765	4 capas	50,30	53,16	30,98	2,92
R765	5 capas	49,42	52,42	30,80	1,17
R765	6 capas	49,12	52,16	30,82	0,39



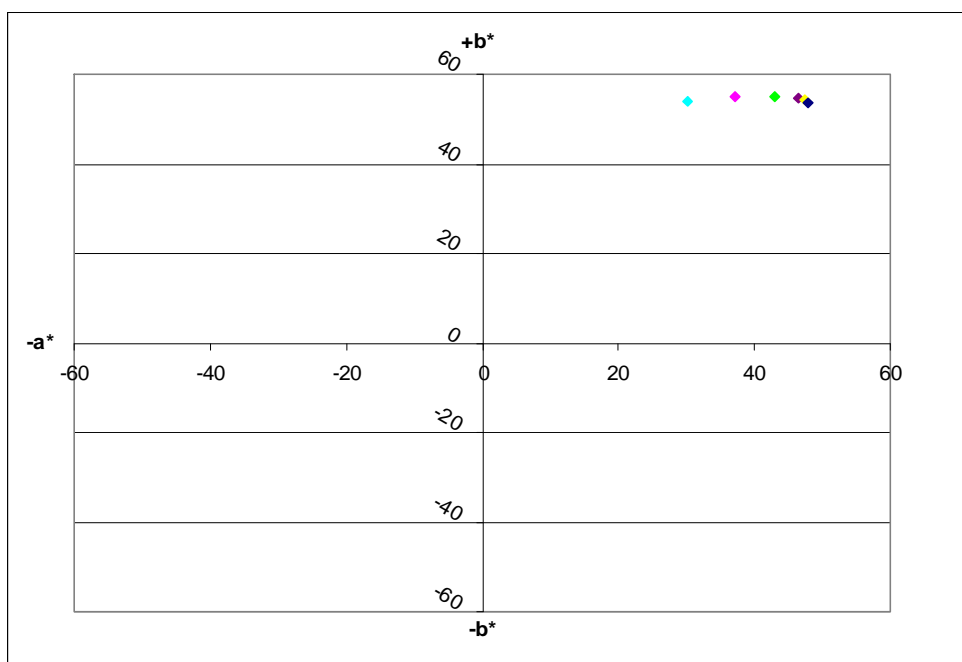
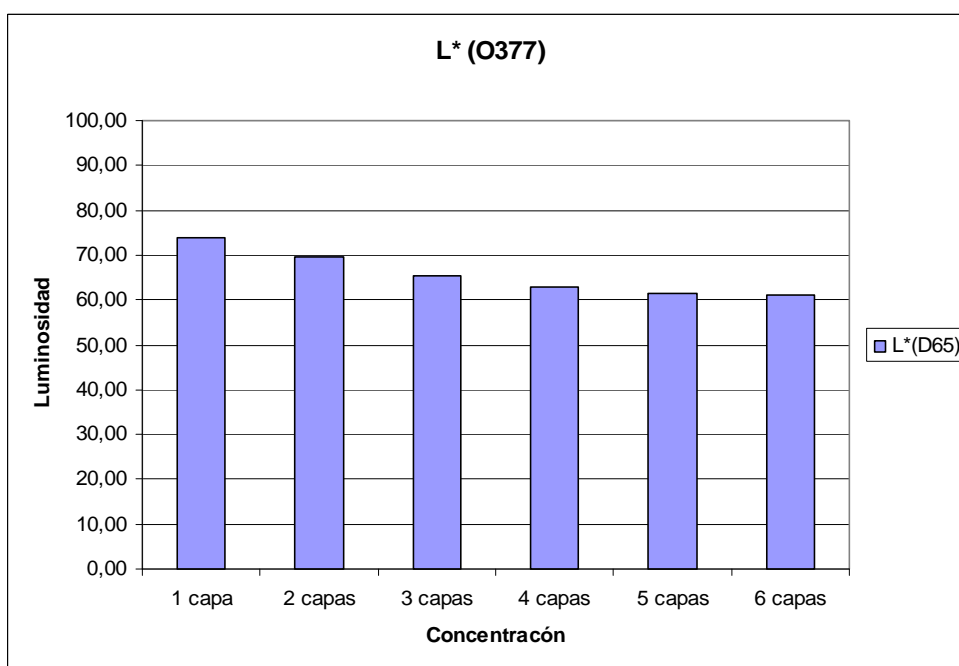
- R934

Color	Nº capas	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	ΔE^*
R934	1 capa	52,84	28,76	21,92	
R934	2 capas	46,90	26,37	18,98	7,05
R934	3 capas	42,29	23,66	16,48	5,90
R934	4 capas	38,36	20,11	14,61	5,62
R934	5 capas	36,20	17,97	13,39	3,28
R934	6 capas	35,85	17,64	13,20	0,51



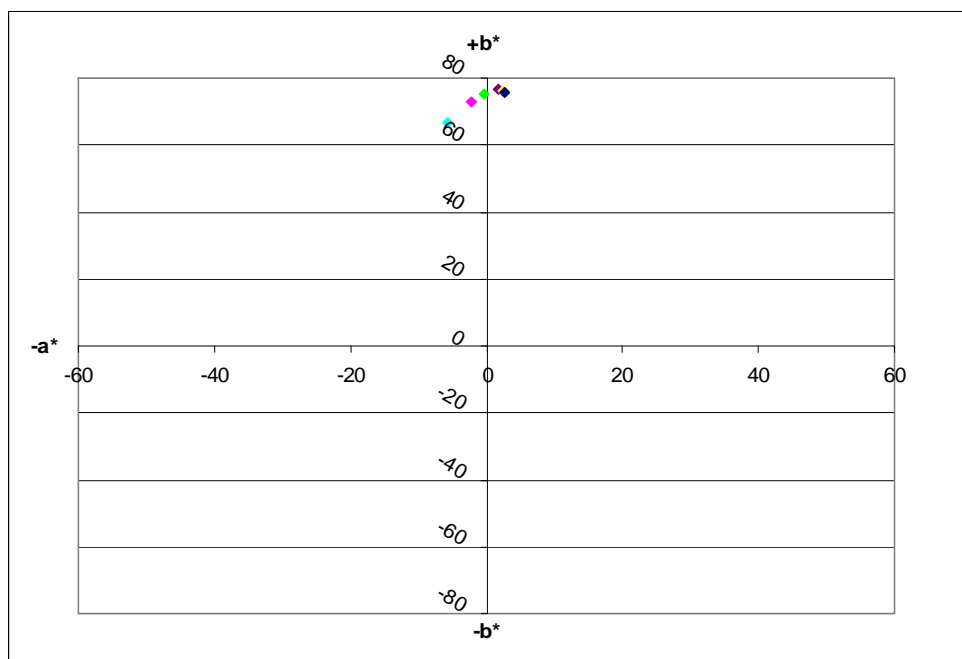
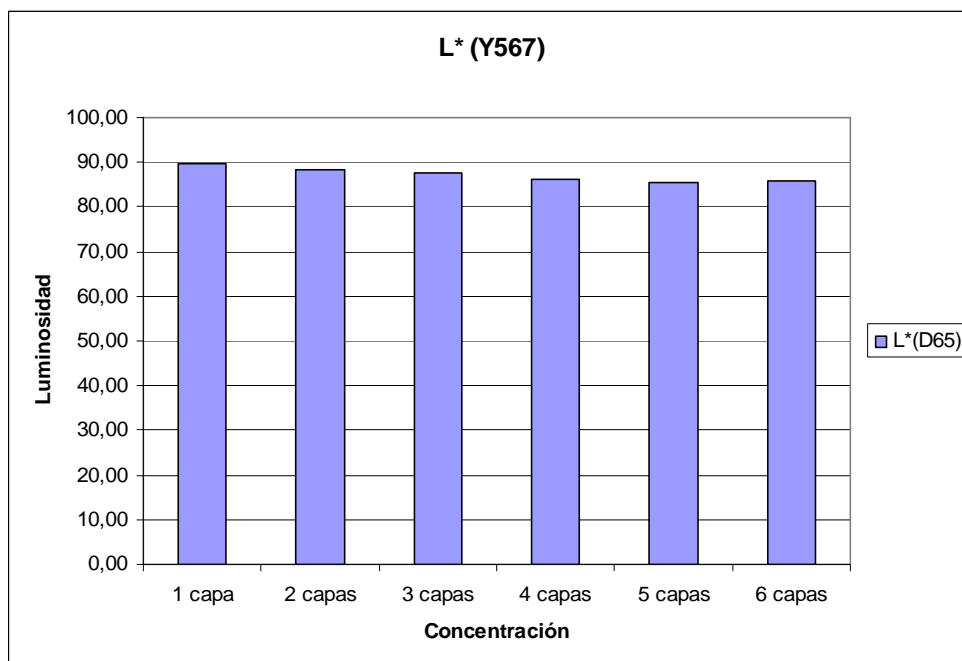
- O377

Color	Nº capas	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	ΔE^*
O377	1 capa	73,92	30,15	53,94	
O377	2 capas	69,52	37,21	55,11	8,40
O377	3 capas	65,53	43,10	55,18	7,11
O377	4 capas	62,74	46,57	54,79	4,47
O377	5 capas	61,59	47,50	54,51	1,51
O377	6 capas	61,13	47,77	53,74	0,94



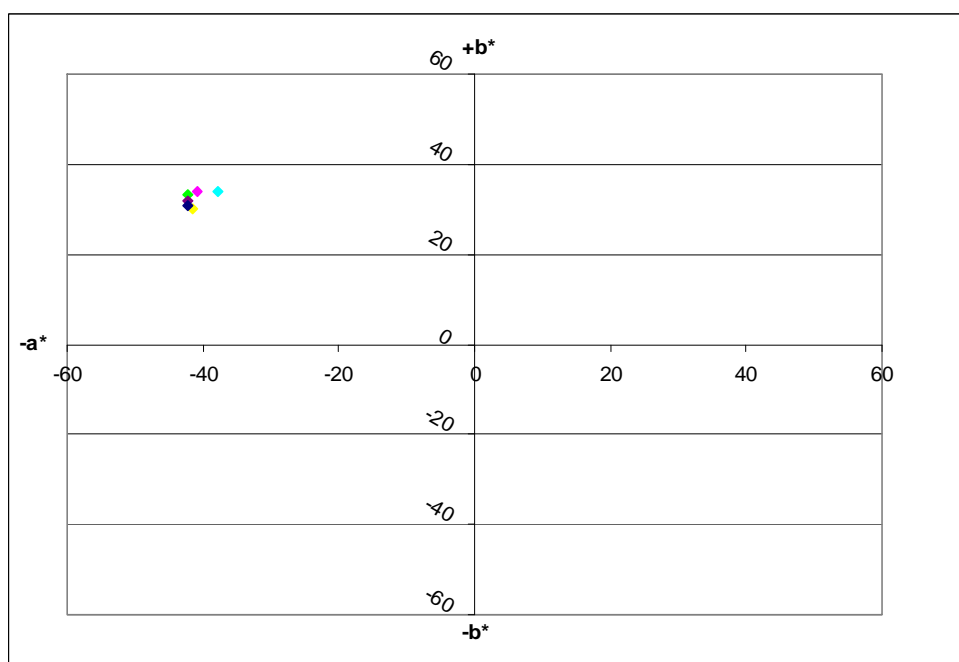
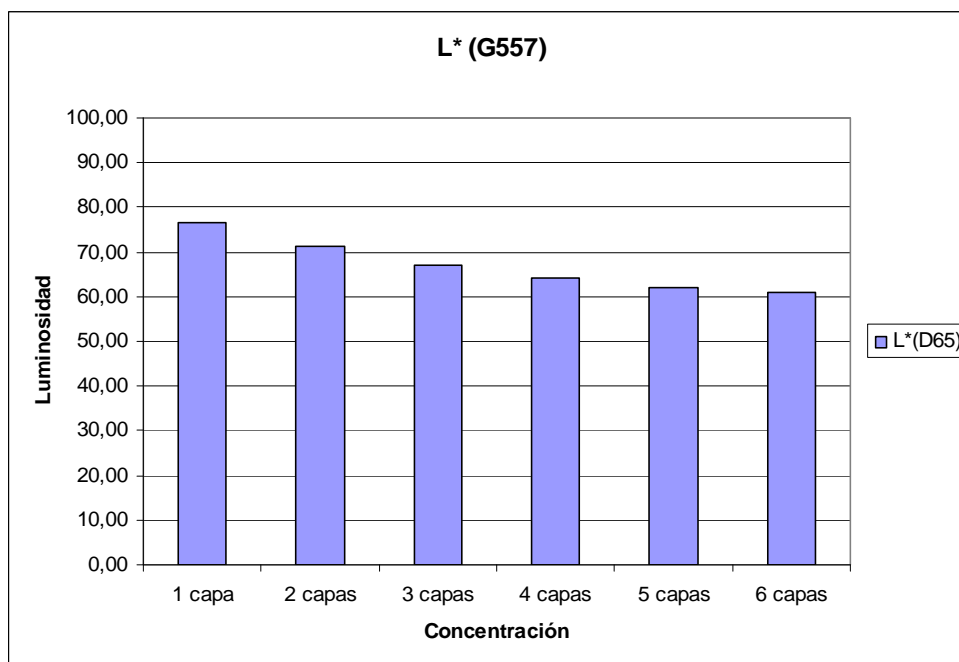
- Y567

Color	Nº capas	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	ΔE^*
Y567	1 capa	89,84	-5,68	66,65	
Y567	2 capas	88,27	-2,28	73,00	7,36
Y567	3 capas	87,41	-0,42	75,18	3,00
Y567	4 capas	86,25	1,80	76,78	2,97
Y567	5 capas	85,45	2,35	76,22	1,13
Y567	6 capas	85,77	2,57	75,85	0,53



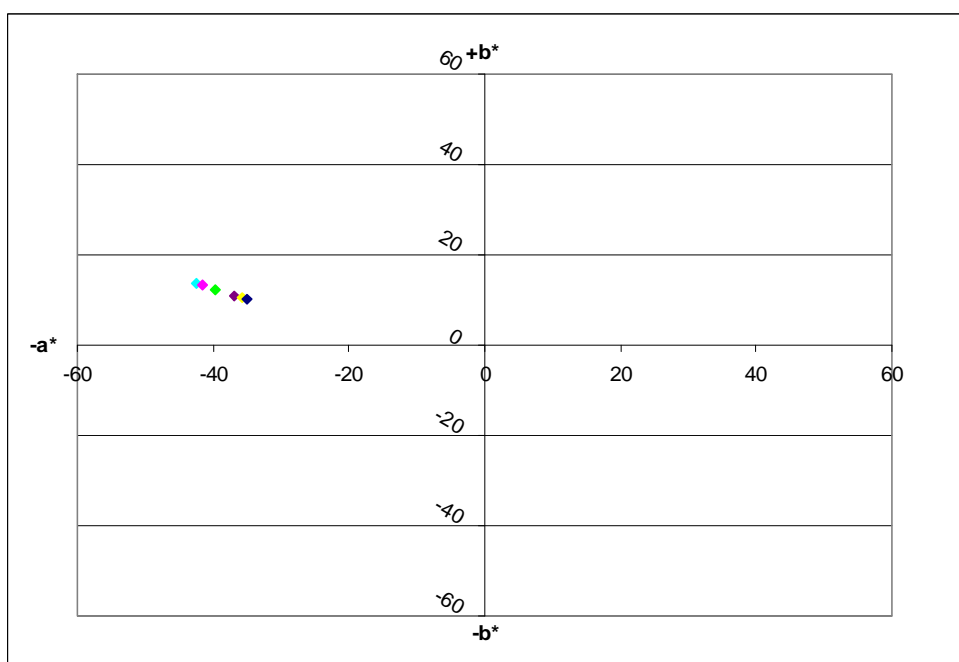
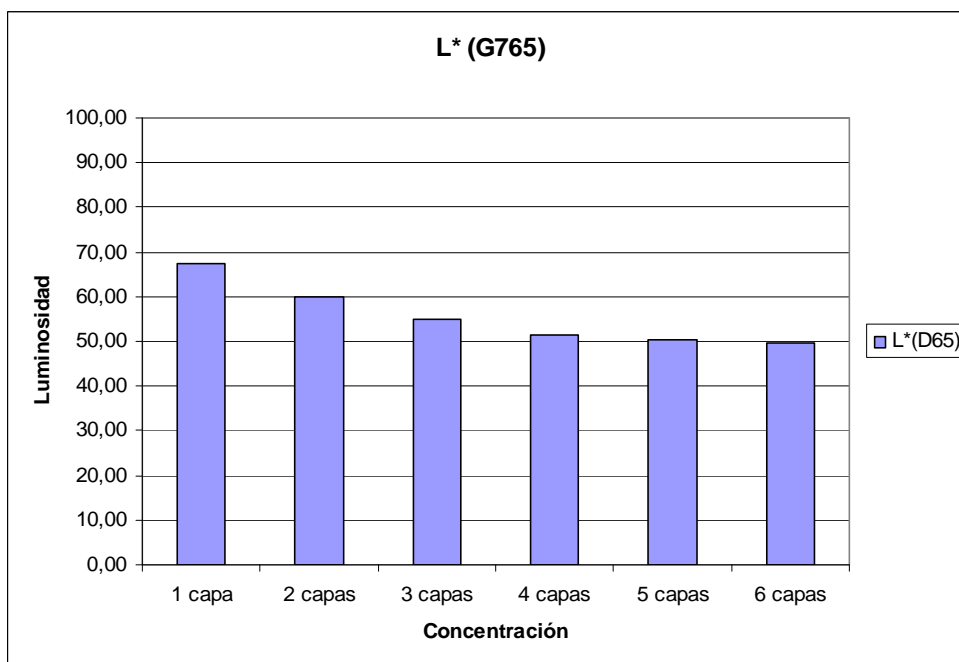
- G557

Color	Nº capas	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	ΔE^*
G557	1 capa	76,52	-37,85	33,80	
G557	2 capas	71,19	-40,77	34,02	6,09
G557	3 capas	66,88	-42,16	33,21	4,60
G557	4 capas	64,09	-42,27	31,82	3,12
G557	5 capas	62,09	-41,50	29,94	2,85
G557	6 capas	61,10	-42,16	30,70	1,41



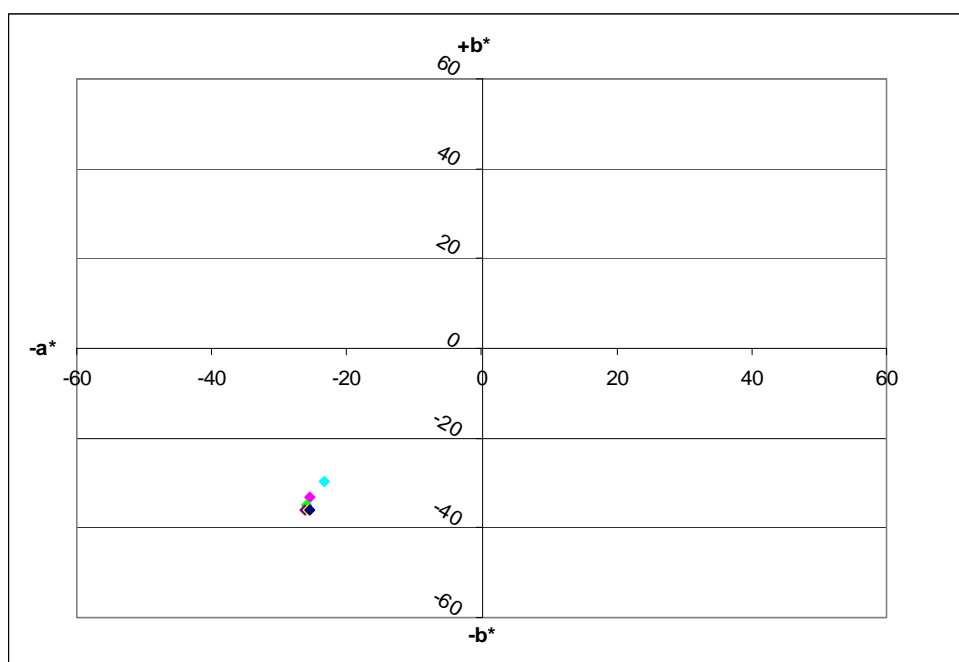
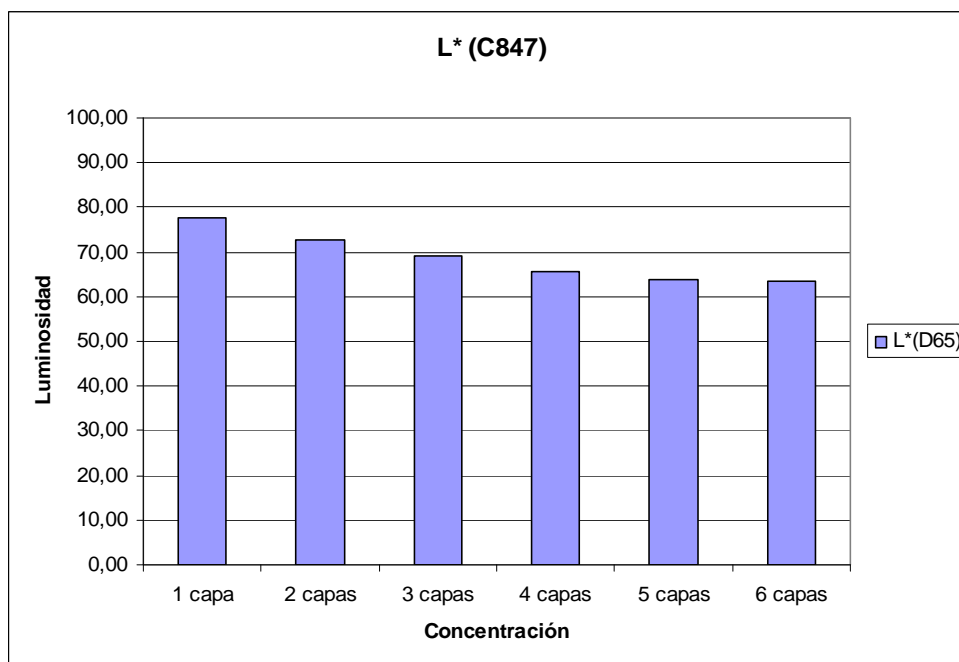
- **G765**

Color	Nº capas	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	ΔE^*
G756	1 capa	67,41	-42,40	13,61	
G756	2 capas	59,97	-41,61	13,26	7,48
G756	3 capas	55,10	-39,75	12,37	5,29
G756	4 capas	51,39	-36,89	10,99	4,89
G756	5 capas	50,38	-35,83	10,41	1,58
G756	6 capas	49,61	-34,93	10,02	1,24



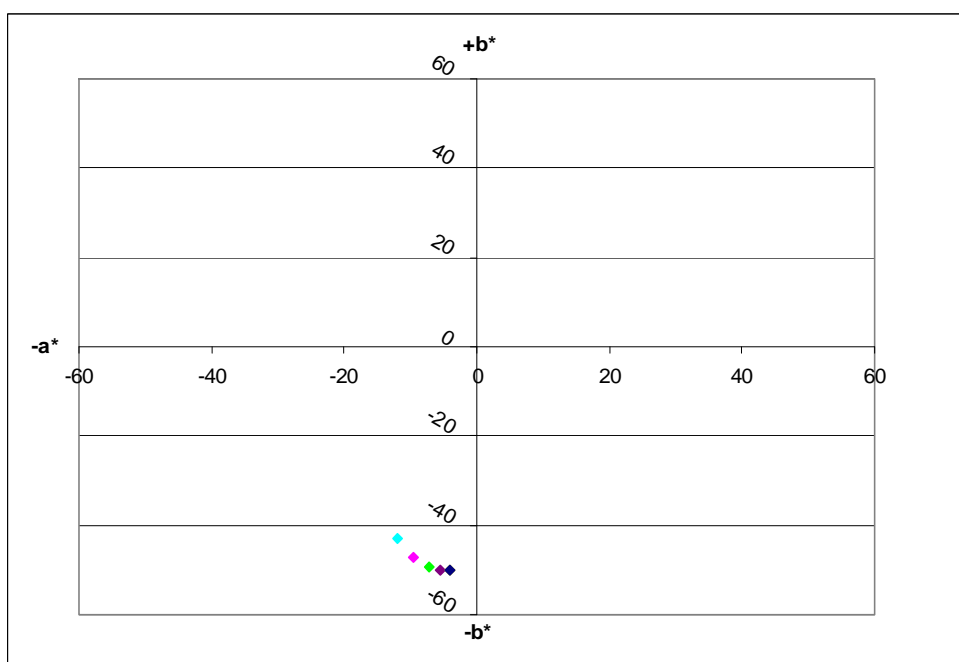
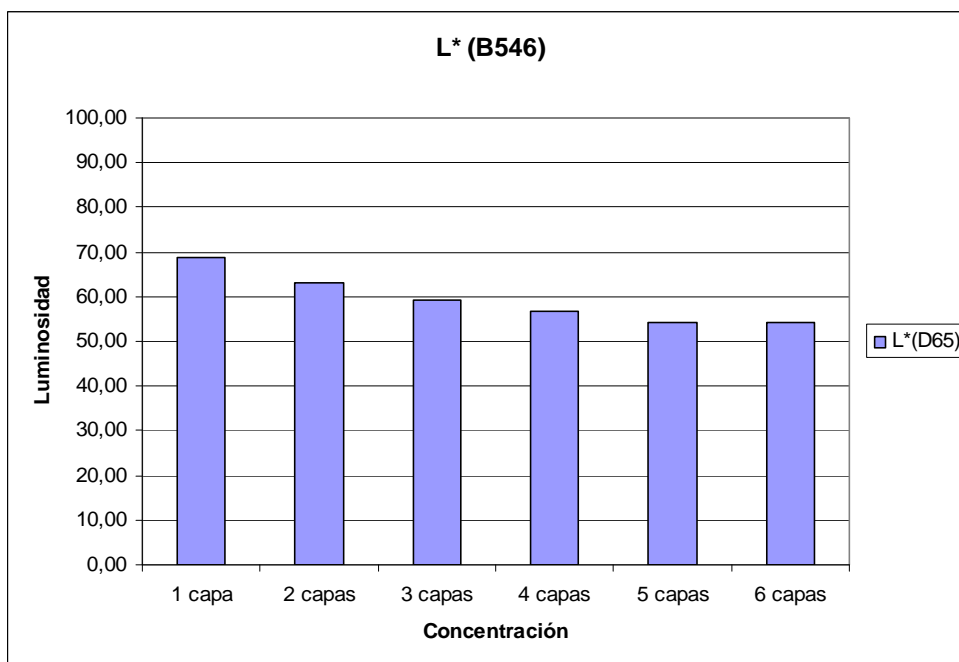
- C847

Color	Nº capas	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	ΔE^*
C847	1 capa	77,83	-23,46	-29,69	
C847	2 capas	72,61	-25,51	-33,29	6,67
C847	3 capas	68,98	-26,01	-34,94	4,02
C847	4 capas	65,61	-26,09	-35,98	3,52
C847	5 capas	63,94	-25,61	-35,95	1,74
C847	6 capas	63,61	-25,53	-36,00	0,34



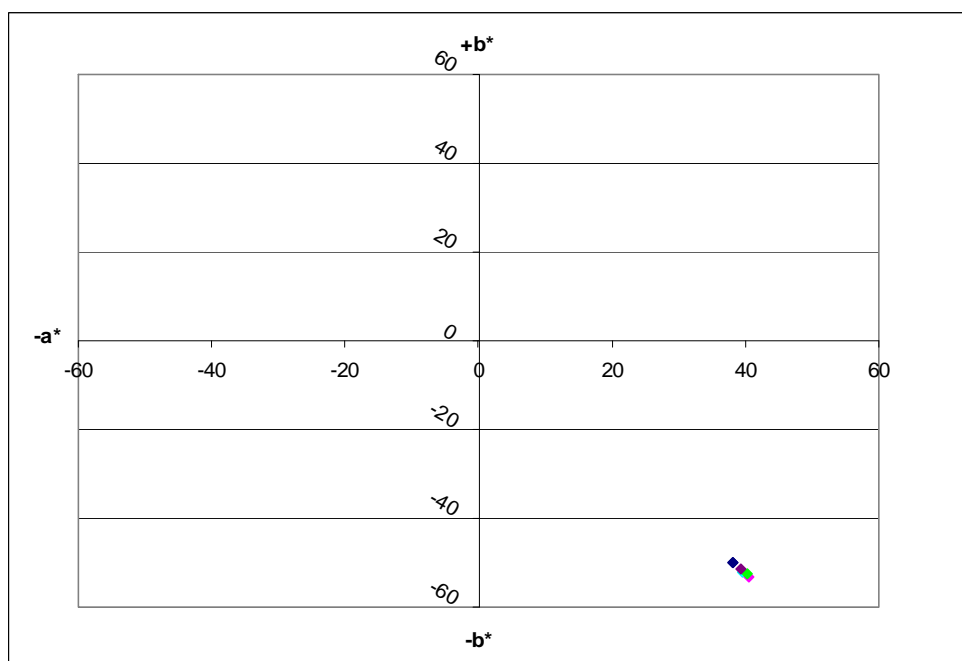
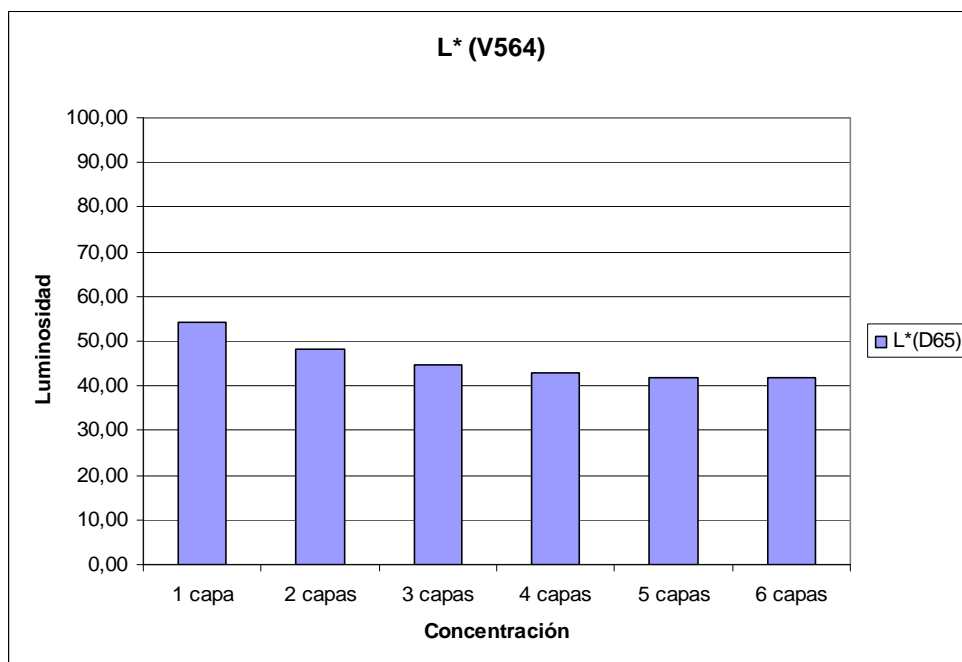
- B546

Color	Nº capas	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	ΔE^*
B546	1 capa	68,79	-12,06	-43,04	
B546	2 capas	63,24	-9,53	-47,29	7,44
B546	3 capas	59,12	-7,12	-49,47	5,24
B546	4 capas	56,56	-5,43	-50,22	3,16
B546	5 capas	54,33	-4,04	-50,06	2,64
B546	6 capas	54,32	-3,98	-50,00	0,09



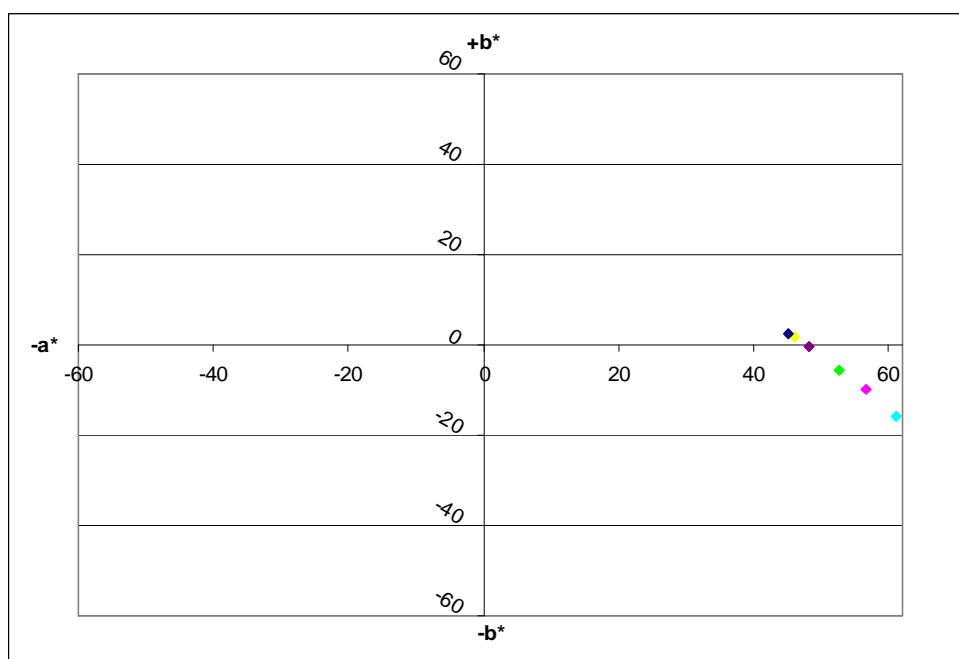
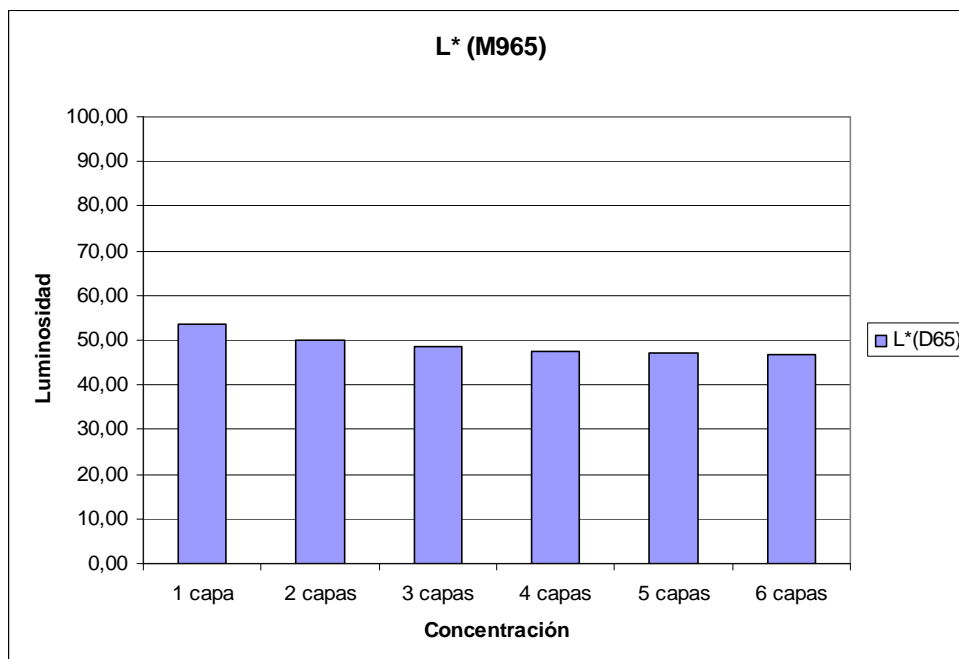
- V564

Color	Nº capas	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	ΔE^*
V564	1 capa	54,15	39,47	-52,19	
V564	2 capas	48,22	40,56	-53,30	6,12
V564	3 capas	44,75	40,29	-52,65	3,55
V564	4 capas	42,93	39,26	-51,30	2,49
V564	5 capas	41,78	38,13	-49,89	2,14
V564	6 capas	42,01	38,10	-49,92	0,23



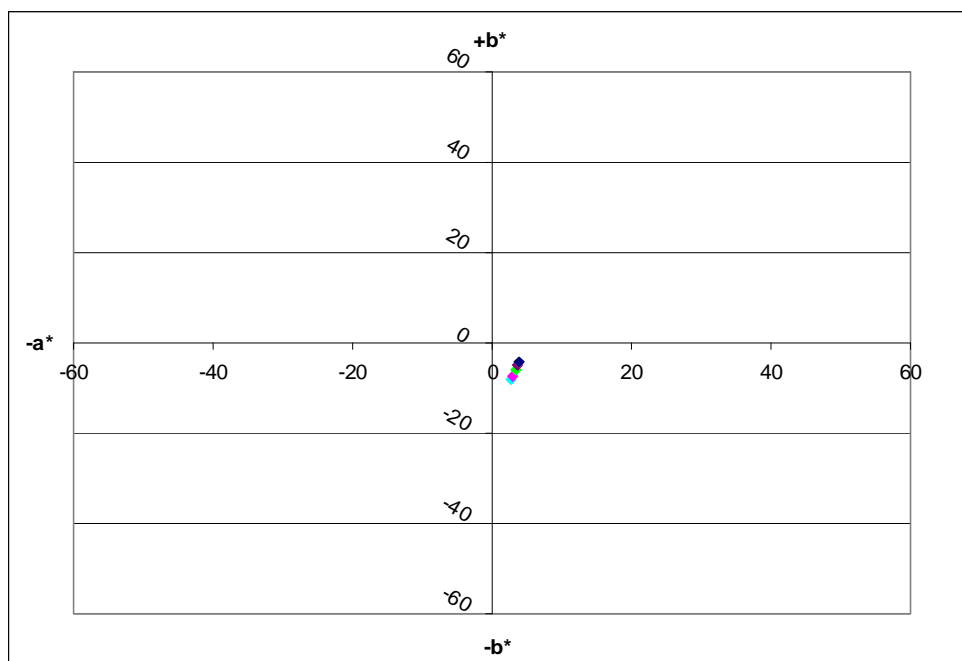
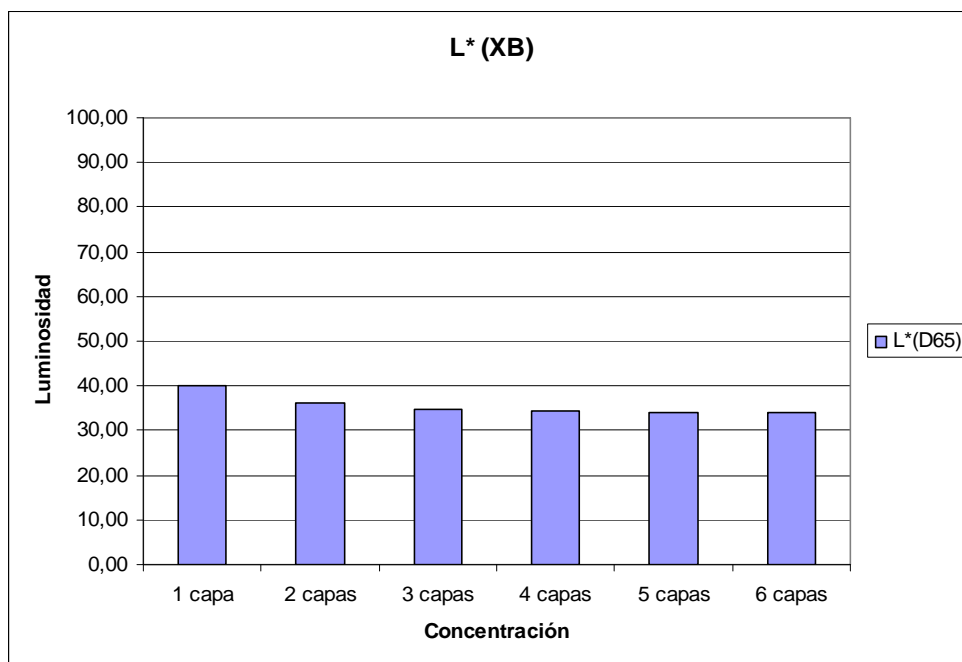
- M965

Color	Nº capas	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	ΔE^*
M965	1 capa	53,40	61,11	-15,83	
M965	2 capas	50,12	56,61	-9,85	8,18
M965	3 capas	48,47	52,55	-5,51	6,16
M965	4 capas	47,60	48,11	-0,40	6,83
M965	5 capas	47,08	46,12	1,73	2,96
M965	6 capas	46,92	45,13	2,51	1,27



- XB**

Color	Nº capas	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	ΔE^*
XB	1 capa	40,17	2,80	-8,12	
XB	2 capas	36,13	2,92	-7,30	4,13
XB	3 capas	34,87	3,37	-5,89	1,95
XB	4 capas	34,25	3,75	-4,81	1,30
XB	5 capas	33,96	3,94	-4,30	0,62
XB	6 capas	34,00	3,94	-4,30	0,04



Evaluación de las coordenadas L*a*b*

La luminancia (L^*), expresado como porcentaje (desde el 0, que indica negro u opaco, hasta el 100, que indica blanco ó transparente), nos da una idea de lo luminoso que es un color o de la iluminación que contiene. Como resultado general, se observa que a medida que aumentamos el número de capas de color, esta disminuye, debido a que al estar el color más saturado, las muestras cada vez son más oscuras (menor luminosidad, más cercanas al negro)

De los doce colores (con sus respectivas saturaciones) analizados, se observa que los colores que tienen una luminosidad más constante que el resto son: el **amarillo**, **magenta**, **cyan** y el **negro**. En estos colores, el rango de luminancia desde la primera capa a la última, no varía en más de un 10%. De hecho, las 2-3 últimas capas, contienen valores muy parecidos, debido a que el color se ha saturado, llegando incluso a tener la última capa un valor más elevado que la anterior (5ª). Esto ocurre con los colores muy claros, como el amarillo o el cyan y con los que son muy oscuros, como es el ejemplo del negro.

En cuanto a las coordenadas de color a^* (medida de la intensidad de color rojo-verde) y b^* (medida de la intensidad de color amarillo-azul), el análisis se ha realizado en gráficas que dividen el espacio en cuatro cuadrantes, es por ello que veremos lo que ocurre en cada uno de ellos:

1. Cuadrante: $[+a^*$ (rojo), $+b^*$ (amarillo)] \rightarrow Los dos tonos rojos, crecen en b^* y la parte de los rojos se mantiene más constante. El marrón y el naranja tienen sus puntos más dispersos entre sí, creciendo el naranja hacia el exterior y el marrón hacia el interior
2. Cuadrante: $[+b^*$ (amarillo), $-a^*$ (verde)] \rightarrow El amarillo, está con valores de b^* altos y con los de a^* rondando el 0. Esto es debido a que la coordenada b^* se corresponde con los amarillos. El verde claro, contiene sus muestras más agrupadas que el oscuro (el cual las tiene bastante equiespaciadas),
3. Cuadrante: $[-a^*$ (verde), $-b^*$ (azul)] \rightarrow Aquí se encuentran el cyan y el azul, los dos creciendo hacia $-b^*$. Se observa, que los dos últimos tonos, tienen valores parecidos (color saturado), ya que aparecen solapados.
4. Cuadrante: $[-b^*$ (azul), $+a^*$ (rojo)] \rightarrow El violeta, tiene los seis valores bastante concentrados, mientras que el magenta los tiene más equiespaciados. Esto es debido a que tarda más en saturarse que el violeta. El negro se encuentra casi en el centro de la gráfica con los valores muy agrupados.

En general, a medida que aumenta el nº de capas, el color se va oscureciendo y va siendo más puro, por eso la mayoría de los tonos, crecen hacia el centro de la gráfica.

Los colores que tienen una distribución mas uniforme y espaciada, son: rojo (R465) marrón (R934), naranja (O377), verde oscuro (G756) y el magenta (M965).

Los que se encuentran más solapados o concentrados en la gráfica, son el negro (XB), violeta (V564), cyan (C847) verde claro (G557).

Evaluación del ΔE^* :

Hemos visto, que la diferencia de color entre dos muestras puede juzgarse a partir de la diferencia entre sus parámetros de color y que la CIE, recomendó dos espacios de color (CIEL*a*b* y CIELuv), para mantener la uniformidad en la práctica. Es por esta razón, que en nuestro caso hemos utilizado las coordenadas CIELAB para el cálculo de la diferencia cromática entre dos muestras.

Según se incrementa la distancia entre dos puntos (L^*_x, a^*_x, b^*_x y $L^*_{x+1}, a^*_{x+1}, b^*_{x+1}$) (siendo x una capa y x+1 dos capas superpuestas de colorante), en nuestro caso entre dos muestras consecutivas de color, es razonable suponer que aumentará la percepción de diferencia cromática entre los estímulos que ambos puntos representan. Una diferencia menor que 3 entre capa y capa, significará que la diferencia de color no es perceptible.

Con los valores de las tablas del apartado anterior (valores de $L^*a^*b^*$) y la fórmula ΔE^* , se han calculado los valores de la diferencia cromática entre muestras adyacentes, entre la primera y la segunda capa, entre la segunda y la tercera, tercera y cuarta... así hasta llegar a la sexta capa.

A modo de resumen, se presenta esta tabla, para observar a partir de que capa se ha saturado cada color y con que valor de ΔE^* . Por ejemplo, para el R465, en la capa 3ª, con $\Delta E^* = 2.98$, quiere decir que entre la 3ª y la 4ª capa ya no hay diferencia, debido a que su valor de ΔE^* es menor que 3, por lo que a partir de la 3ª capa el color ya se ha saturado.

Color	Capa	ΔE^*
R465	3º	2.98
R765	3º	2.92
R934	5º	0.51
O377	4º	1.51
Y567	3º	2.97
G557	4º	2.85
G756	4º	1.58
C847	4º	1.74
B546	4º	2.64
V564	3º	2.49
M965	4º	2.96
XB	2º	1.95

Todos los valores presentados en la tabla, son ya menores que 3, pero a mayor valor de ΔE^* , como por ejemplo el rojo (R465) con una diferencia de 2.98 en la 3ª capa, significa que entre la 3ª y la 4ª capa la diferencia cromática no es apreciable, pero por poco.

En general para la mayoría de los colores, la saturación de color llega en la 4ª capa, a partir de la cual, con la 5ª y la 6ª capa no se apreciará diferencia.

Se observa que el negro (XB), es el primer color que se satura, debido a que su diferencia entre la segunda y la tercera capa, es menor que 3, por lo que a partir de dos capas de negro (2ª capa), aunque pintemos más, nuestro ojo no notará la diferencia.

De los doce colores, hay cuatro que aguantan hasta 4 capas de color, antes de llegar a saturarse, estos son: El naranja (O377), el verde clarito (G557), el azul oscuro (B546) y el magenta (M965).

El marrón, es el color que más tarda en saturarse, pudiendo diferenciar hasta 5 capas, la 6ª capa y será igual que la 5ª.

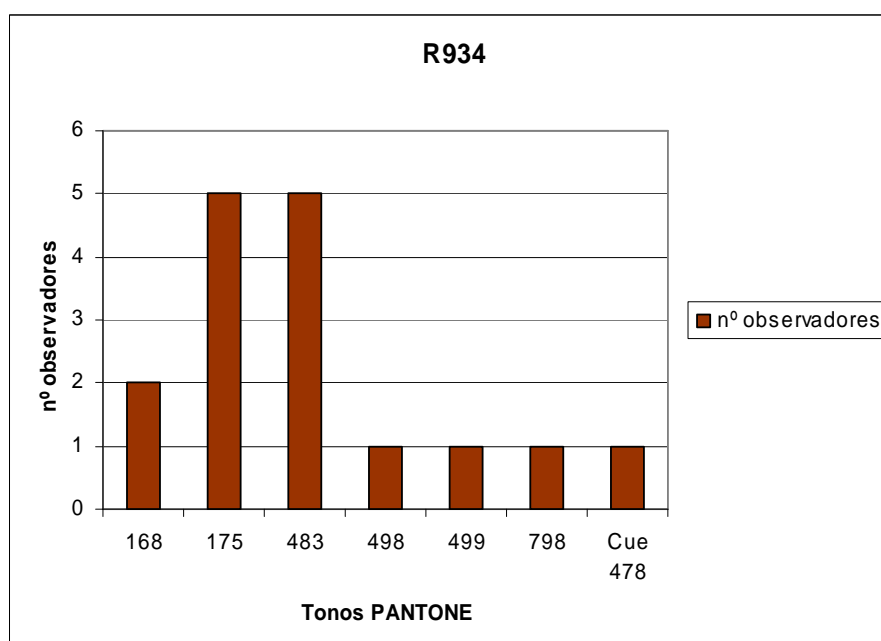
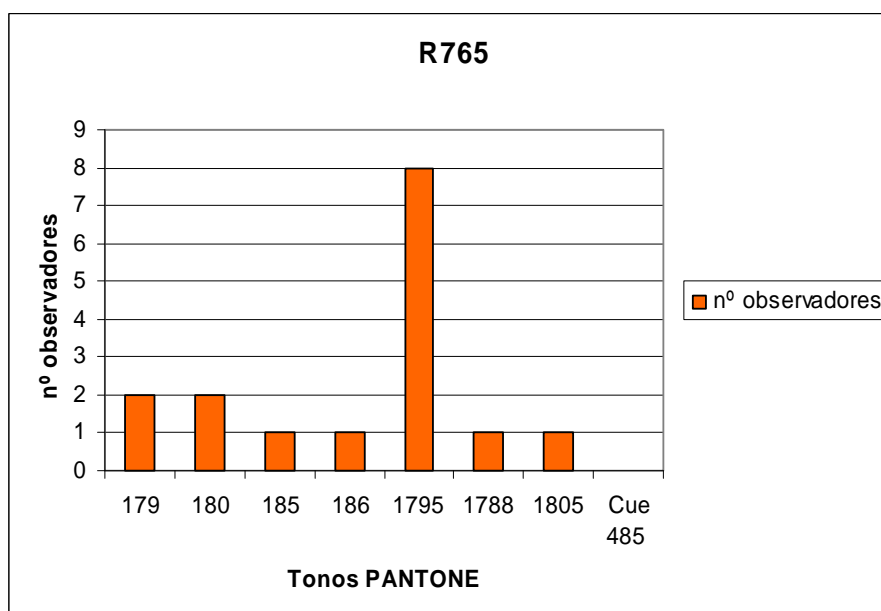
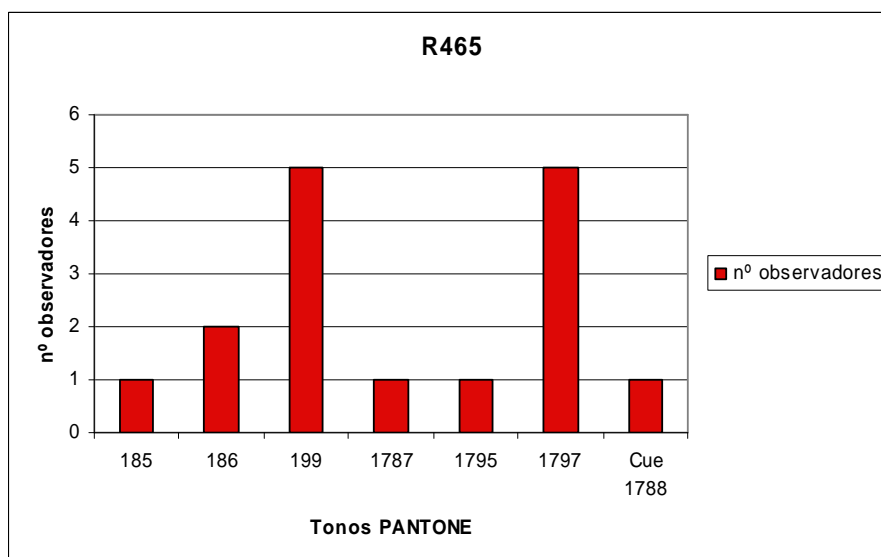
4.3.3. Test de color Pantone

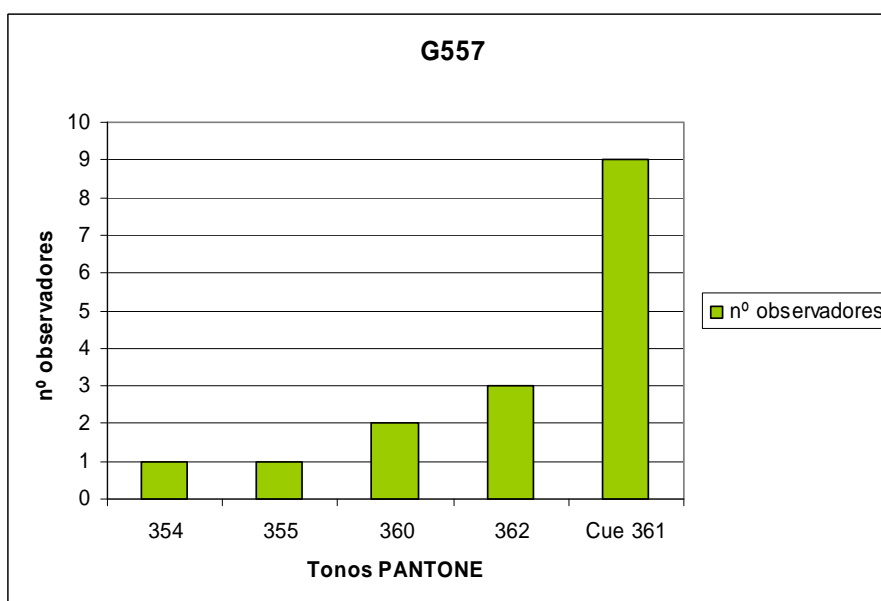
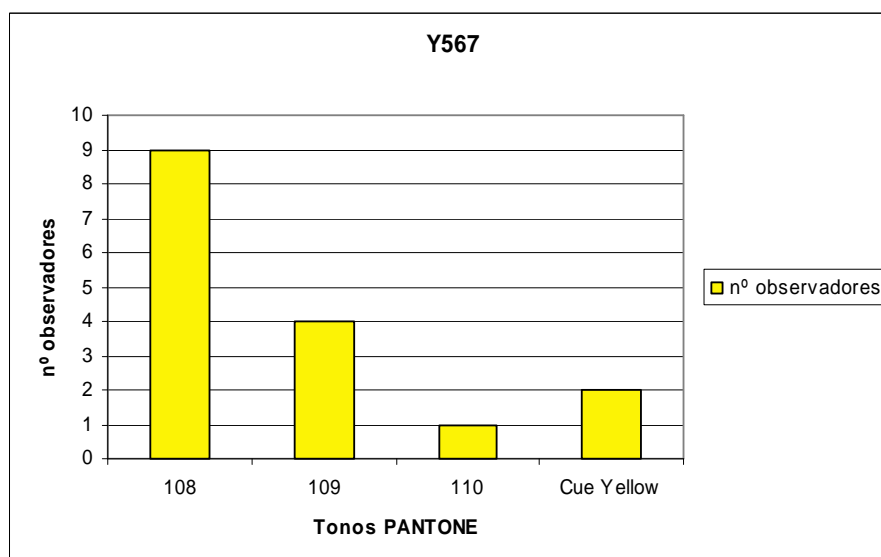
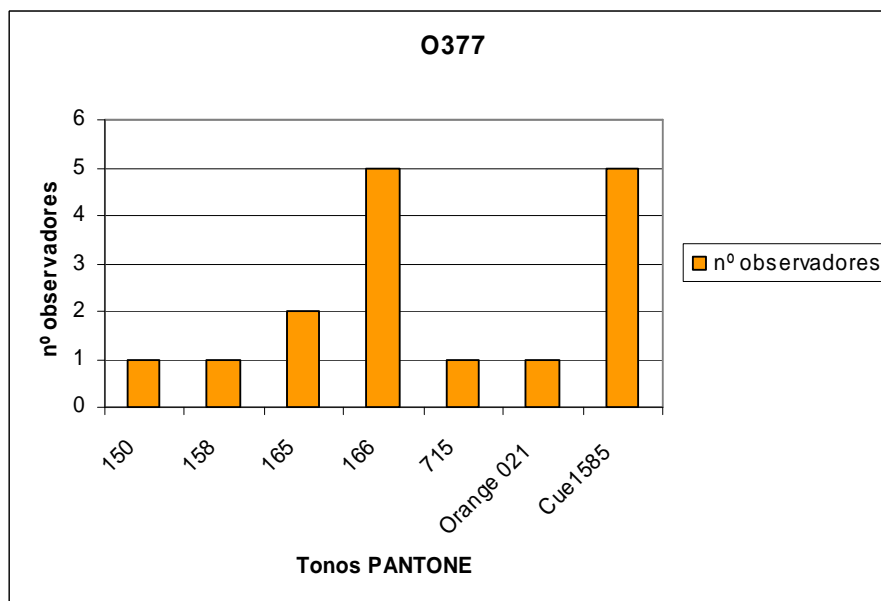
Como se comentó en el método operativo, se ha realizado un estudio en el que diferentes observadores han elegido un tono de las guías Pantone, como tono más aproximado a los 12 colores de los rotuladores cuando estos se encuentran en su máximo de saturación. De los dos estudios realizados, veremos ahora cuales han sido los resultados obtenidos.

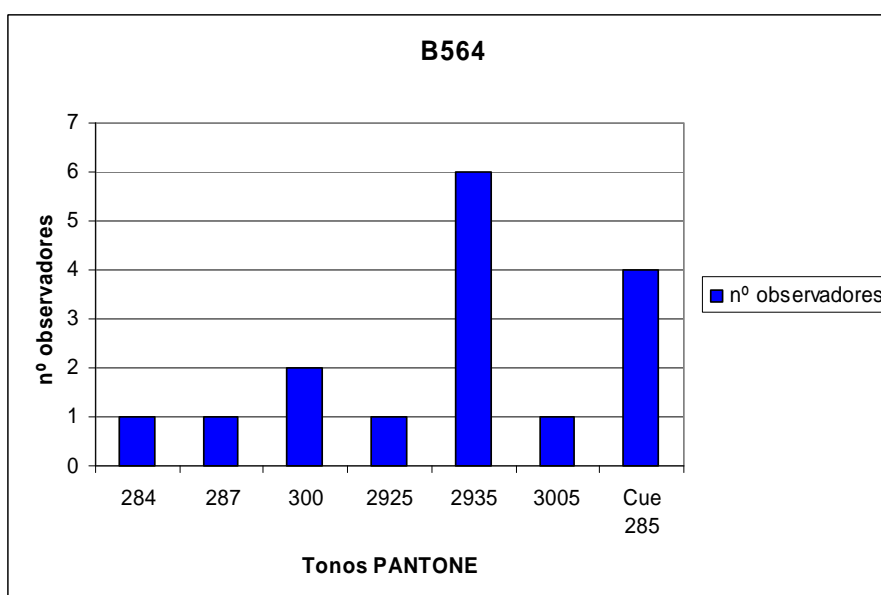
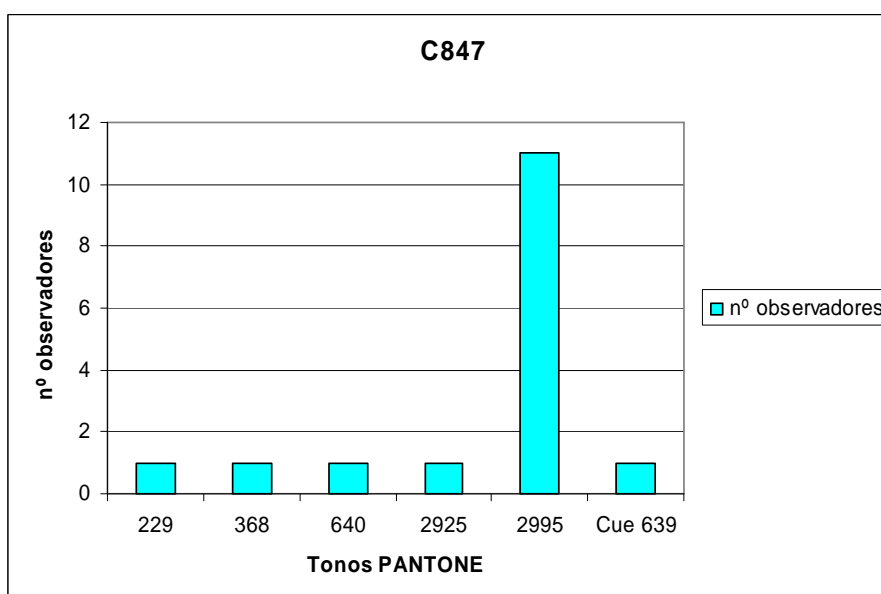
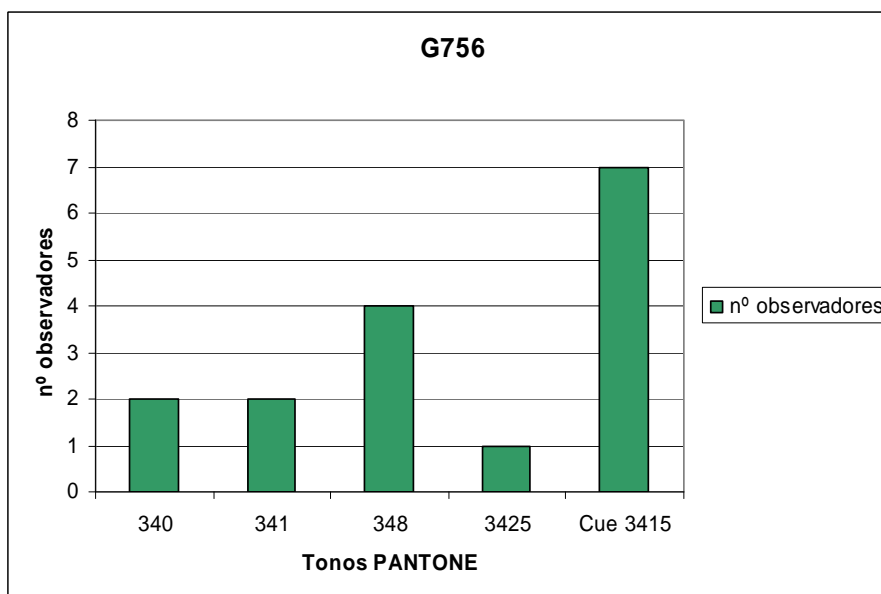
a. Estudio preliminar:

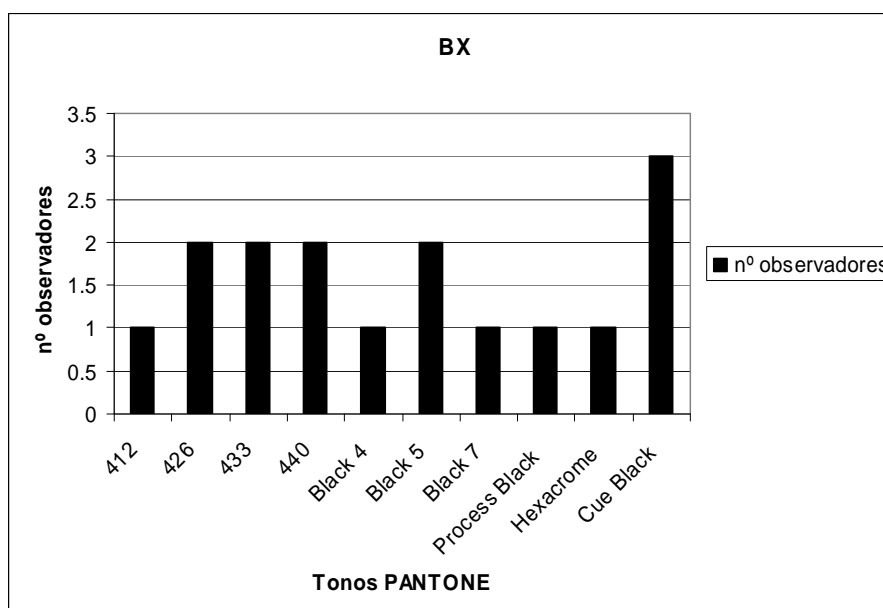
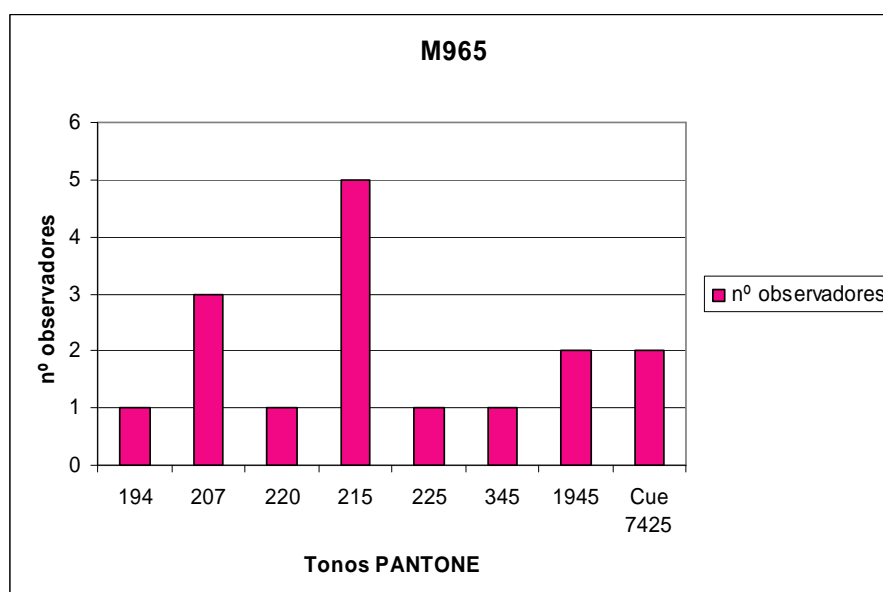
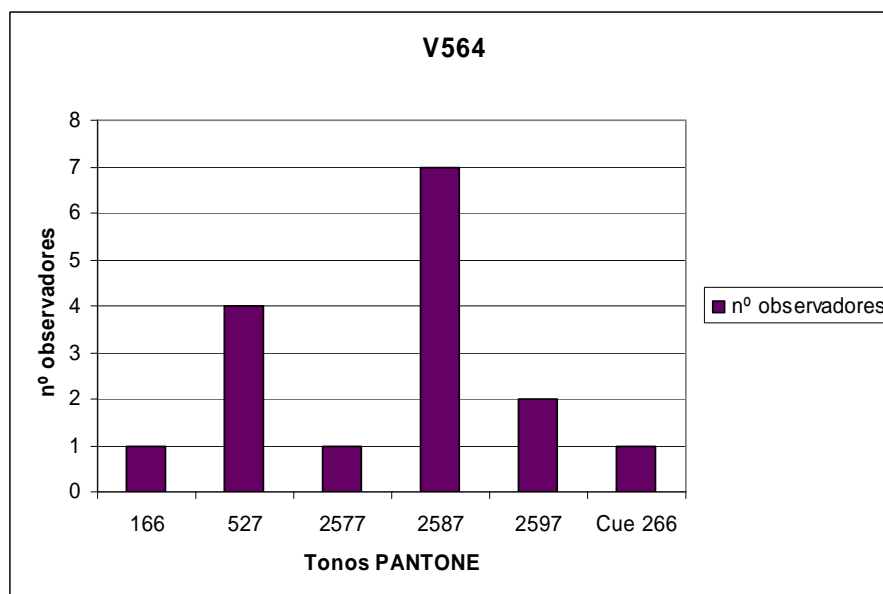
En este primer estudio, se presentan doce gráficas, en las que 16 observadores han aproximado cada color a un tono de las guías Pantone, mirando en todo el abanico de colores. En la última columna, se muestra el resultado de cuantos observadores han coincidido con el valor que el colorímetro *Color Cue* da como tono Pantone más aproximado. A modo de resumen, aparece una tabla después de las gráficas, en la cual se muestra, cuantos de los 12 rotuladores se ha coincidido con el resultado del Color Cue.

En las siguientes páginas, se mostrarán las gráficas correspondientes a los diferentes valores de los tonos Pantone que han sido elegidos como tonos más aproximados a las muestras (las correspondientes a 6 capas superpuestas de rotulador), por 16 observadores:









Color	Observadores	Color Cue
R465	1797	1788
R765	1795	485
R934	483	478
O377	166	1585
Y567	108	Yellow
G557	361	361
G756	3415	3415
C847	2995	639
B546	2935	285
V564	2587	266
M965	215	7425
XB	Black	Black

Se observa que de los 12 colores, solo se ha coincidido en 3 de ellos (los que están en verde), por lo que, podríamos decir que el colorímetro *Color Cue 2.1* tiene una fiabilidad del 25%.

En el cyan (C847), amarillo (Y567), marrón (R934) y el rojo (R765), no ha habido ninguna coincidencia por parte de los observadores, sin embargo, para los colores; rojo (R465), naranja (O377), azul (B546), violeta (564) y magenta (M965), hay algunos observadores que si han determinado el mismo tono que el *Color Cue 2.1*.

Una cosa curiosa que ocurre en el estudio final, es que al reducir el numero de tonos a elegir, el más votado del estudio preliminar cambia.

b. Estudio final:

Para esta segunda prueba, en la que el número de tonos a elegir se ha reducido a cuatro, se ha realizado el test *Isihara* a cada uno de los observadores, para ver si presentaban algún tipo de anomalía en la visión. Este test, también se realiza dentro de la cabina de iluminación *Macbeth SpectraLight III*, para tener una correcta iluminación sobre las láminas y poder observarlas perfectamente. Para que no hubiese brillos, se utilizó una bandeja que estaba a 45 grados para poder colocar las muestras de rotulador sobre ella

La tabla que se presenta a continuación (en la siguiente página) es la que se ha empleado en este segundo estudio para que los observadores anotasen sus resultados. Aparecen huecos para colocar los valores de las 13 primeras láminas del test *Isihara* y los cuatro posibles tonos *Pantone*, para poder comparar y posteriormente elegir cual es el más parecido a la muestra correspondiente de las seis capas superpuestas de rotulador.

menor ΔE^* , y los que estén subrayados, los que la mayoría de los observadores hayan elegido.

De las 46 personas que han realizado el test, 2 personas padecen deficiencia para el rojo-verde. Estas dos personas (hombres) han realizado la selección de los tonos como todos los demás, sin entrar (no siempre) en los porcentajes de los tonos menos votados. Estos dos observadores, no están incluidos en los porcentajes y tablas de los tonos más votados.

Tono	L*	a*	b*	C	h_{ab}	ΔE^*	ΔL^*	ΔC	Δh_{ab}	%total
*1788	56.19	60.61	34.79	69.88	29.86	12.16	7.23	8.01	4.88	0.0
1797	48.33	50.96	23.61	56.16	24.85	5.74	-0.63	-5.71	-0.13	36.4
186	48.71	55.21	26.39	61.2	25.55	0.95	-0.25	-0.67	0.57	40.9
199	50.78	55.18	22.96	59.77	22.59	3.77	1.82	-2.10	-2.39	22.7
R465	48.96	56.09	26.13	61.87	24.98	0.00	0.00	0.00	0.00	
Tono	L*	a*	b*	C	h_{ab}	ΔE^*	ΔL^*	ΔC	Δh_{ab}	%total
179	55.05	53.5	35.13	64.01	33.29	7.45	5.93	3.37	2.74	2.3
1795	50.51	53.96	30.97	62.22	29.85	2.28	1.39	1.58	-0.70	34.0
180	48.78	44.11	28.76	52.66	33.11	8.32	-0.34	-7.98	2.56	59.1
*485	50.5	52.17	38.81	65.02	36.65	8.11	1.38	4.38	6.10	4.5
R765	49.12	52.16	30.82	60.64	30.55	0.00	0.00	0.00	0.00	
Tono	L*	a*	b*	C	h_{ab}	ΔE^*	ΔL^*	ΔC	Δh_{ab}	%total
168	37.92	18.47	22.39	29.03	50.48	9.46	2.07	7.00	13.68	0.0
175	39.1	18.87	18.28	26.27	44.09	6.16	3.25	4.24	7.29	34.1
*478	40.23	14.14	17.64	22.61	51.27	7.15	4.38	0.58	14.47	4.5
483	40.23	16.42	16.86	23.54	45.75	5.84	4.38	1.51	8.95	61.4
R934	35.85	17.64	13.20	22.03	36.80	0.00	0.00	0.00	0.00	
Tono	L*	a*	b*	C	h_{ab}	ΔE^*	ΔL^*	ΔC	Δh_{ab}	%total
orange 02	63.2	51.08	61.86	80.22	50.45	9.01	2.07	8.32	2.08	9.1
*1585	65.46	46.23	56.41	72.93	50.66	5.32	4.33	1.03	2.29	31.8
165	64.87	48.38	54.94	73.2	48.63	3.98	3.74	1.30	0.26	31.8
166	57.5	44.92	49.88	67.13	48	6.01	-3.63	-4.77	-0.37	27.3
O377	61.13	47.77	53.74	71.90	48.37	0.00	0.00	0.00	0.00	
Tono	L*	a*	b*	C	h_{ab}	ΔE^*	ΔL^*	ΔC	Δh_{ab}	%total
*Yellow	86.6	-1.52	95.42	95.43	90.91	20.01	0.83	19.53	2.85	2.3
108	86.47	0.09	80.57	80.57	89.94	5.38	0.70	4.67	1.88	54.5
109	84.51	4.03	86.74	86.83	87.34	11.06	-1.26	10.93	-0.72	36.4
Yellow 012	85.44	4.01	94.88	94.97	87.58	19.08	-0.33	19.07	-0.48	6.8
Y567	85.77	2.57	75.85	75.90	88.06	0.00	0.00	0.00	0.00	
Tono	L*	a*	b*	C	h_{ab}	ΔE^*	ΔL^*	ΔC	Δh_{ab}	%total
360	70.15	-40.13	43.7	59.33	132.57	15.97	9.05	7.18	-11.37	0.0
*361	64.33	-45.19	45.01	63.78	135.11	14.98	3.23	11.63	-8.83	34.1
362	58.64	-37.71	39.75	54.79	133.49	10.38	-2.46	2.64	-10.45	61.4
363	53.91	-32.67	35.03	47.9	133.01	12.67	-7.19	-4.25	-10.93	4.5
G557	61.10	-42.16	30.70	52.15	143.94	0.00	0.00	0.00	0.00	
Tono	L*	a*	b*	C	h_{ab}	ΔE^*	ΔL^*	ΔC	Δh_{ab}	%total
340	55.45	-54.72	14.83	56.69	164.84	21.18	5.84	20.35	0.85	0.0
341	46.62	-38.33	9.56	39.5	166	4.55	-2.99	3.16	2.01	13.6
*3415	48.17	-40.26	12.66	42.2	162.54	6.12	-1.44	5.86	-1.45	86.4
348	49.01	-43.39	21.5	48.42	153.63	14.27	-0.60	12.08	-10.36	0.0
G756	49.61	-34.93	10.02	36.34	163.99	0.00	0.00	0.00	0.00	
Tono	L*	a*	b*	C	h_{ab}	ΔE^*	ΔL^*	ΔC	Δh_{ab}	%total
229	67.13	-21.09	-34.32	40.28	238.42	5.91	3.52	-3.90	3.72	2.2
2995	65.49	-26.5	-32.98	42.31	231.21	3.69	1.88	-1.87	-3.49	70.5
638	69.09	-28.82	-25.38	38.4	221.37	12.39	5.48	-5.78	-13.33	0.0
*639	61.14	-31.33	-30.97	44.05	224.67	8.06	-2.47	-0.13	-10.03	27.3
C847	63.61	-25.53	-36.00	44.18	234.70	0.00	0.00	0.00	0.00	
Tono	L*	a*	b*	C	h_{ab}	ΔE^*	ΔL^*	ΔC	Δh_{ab}	%total
*285	57.37	-5.16	-43.8	44.33	263.31	6.81	3.05	-5.91	-2.14	50.0
2935	46.92	-6.4	-49.03	49.44	262.57	7.85	-7.40	-0.80	-2.88	50.0
300	49.07	-15.4	-47.21	49.66	251.94	12.87	-5.25	-0.58	-13.51	0.0
279	61.13	-4.59	-39.75	40.01	263.42	12.32	6.81	-10.23	-2.03	0.0
B546	54.32	-3.98	-50.00	50.24	265.45	0.00	0.00	0.00	0.00	
Tono	L*	a*	b*	C	h_{ab}	ΔE^*	ΔL^*	ΔC	Δh_{ab}	%total
2587	49.06	30.11	-37.75	48.29	308.57	16.18	7.05	-14.51	1.22	11.4
2597	35.48	34.63	-40.76	53.49	310.36	11.77	-6.53	-9.31	3.01	2.3
*266	46.12	32.25	-49.04	58.69	303.33	7.21	4.11	-4.11	-4.02	4.5
527	41.69	33.78	-41.09	53.19	309.43	9.84	-0.32	-9.61	2.08	81.8
V564	42.01	38.10	-49.92	62.80	307.35	0.00	0.00	0.00	0.00	
Tono	L*	a*	b*	C	h_{ab}	ΔE^*	ΔL^*	ΔC	Δh_{ab}	%total
1945	45.9	45.54	10.76	46.8	13.29	8.33	-1.02	1.60	10.11	40.9
207	43.14	47.71	10.23	48.79	12.1	8.98	-3.78	3.59	8.92	6.8
215	42.27	45	3.92	45.17	4.97	4.86	-4.65	-0.03	1.79	6.8
*7425	49.58	45.09	4.58	45.33	5.8	3.37	2.66	0.13	2.62	45.5
M965	46.92	45.13	2.51	45.20	3.18	0.00	0.00	0.00	0.00	
Tono	L*	a*	b*	C	h_{ab}	ΔE^*	ΔL^*	ΔC	Δh_{ab}	%total
*Black	27.9	1.06	3.85	3.99	74.6	10.58	-6.10	-1.77	121.47	29.5
426	30.04	0.56	0.2	0.59	19.67	6.88	-3.96	-5.17	66.54	27.3
433	28.44	0.02	-3.37	3.37	270.32	6.86	-5.56	-2.39	-42.81	2.3
Black 5	30.95	6.38	2.69	6.93	22.83	8.01	-3.05	1.17	69.70	40.9
XB	34.00	3.94	-4.30	5.76	313.13	0.00	0.00	0.00	0.00	

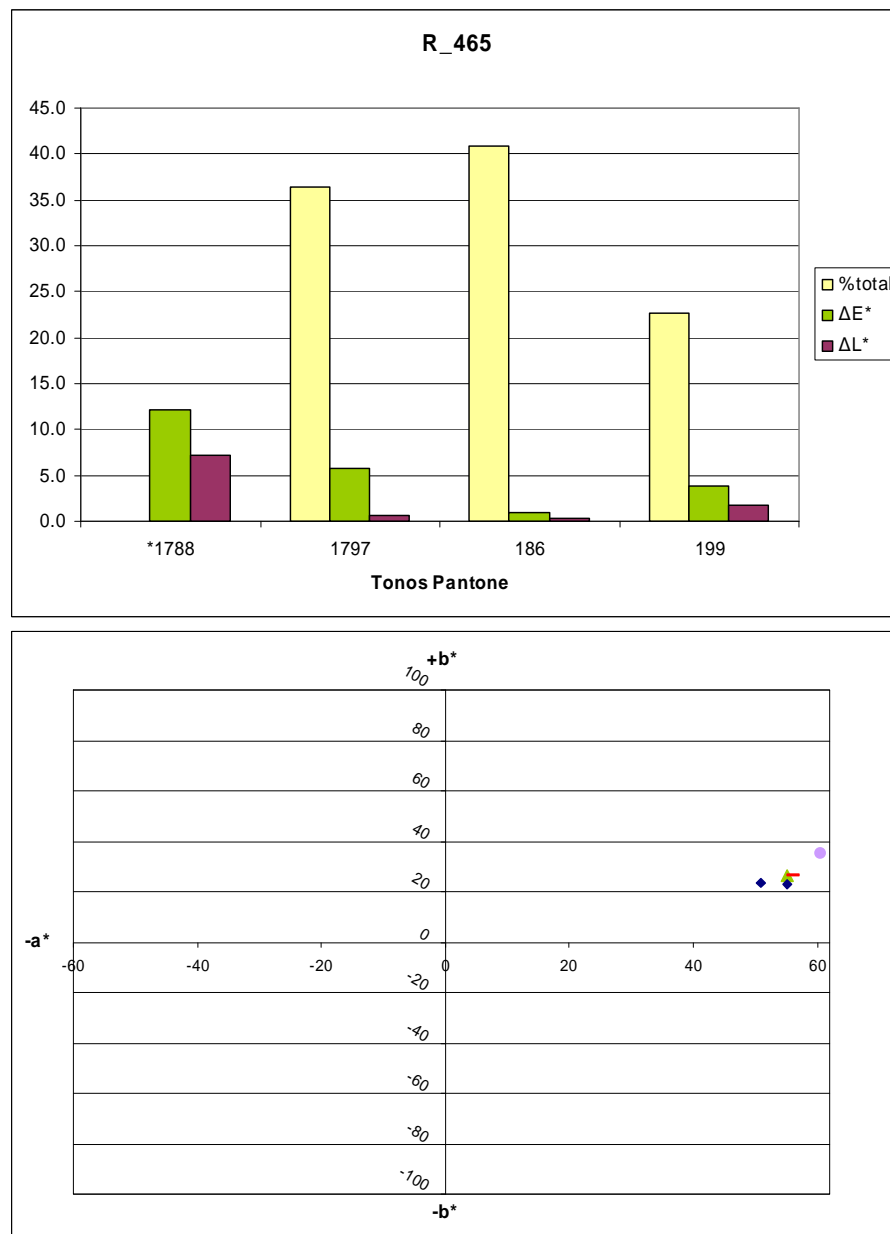
En las siguientes páginas, se muestran las gráficas de: el porcentaje de gente que ha elegido cada tono con su respectiva ΔE^* y ΔL^* , y las gráficas de las coordenadas de color para poder observar visualmente donde se colocan exactamente los tonos en el plano a^*b^* y a que distancia.

- La RAYA, es la muestra del rotulador.
- El ASTERISCO morado, es el tono que el colorímetro *Color Cue* ha medido como tono más aproximado a la muestra. Si el asterisco es verde, será que menor valor de ΔE^* y valor del *Color Cue* coinciden en un mismo tono.
- El TRIANGULO de color berenjena, significa que la mayoría de los observadores han elegido ese tono, como el más parecido a la muestra de rotulador. Si el triángulo es verde, será que la mayoría de los observadores coinciden con el menor valor de ΔE^* y si es morado, que los observadores coinciden con el resultado del *Color Cue*. Un triángulo verde con borde morado, significa que menor ΔE^* , *Color Cue* y mayoría de observadores coinciden.
- El ROMBO de color verde, es el tono que tiene la menor ΔE^* .
- Los rombos azules oscuros, son los tonos Pantone, o que tienen ΔE^* mayores que el resto o que nadie ha elegido como tono mas aproximado a la muestra de rotulador, en definitiva, los más diferentes, y casi siempre los puntos más alejados de la muestra de rotulador (las rayas del propio color del rotulador).

En general, el punto verde estará siempre más cercano a simple vista al rojo que el resto, debido a que es el tono con menor ΔE^* respecto a la muestra de rotulador.

Debajo de cada gráfica habrá una breve explicación ó comentario a cerca de los deferentes valores obtenidos en las tablas y por consiguiente, en las gráficas.

- R465



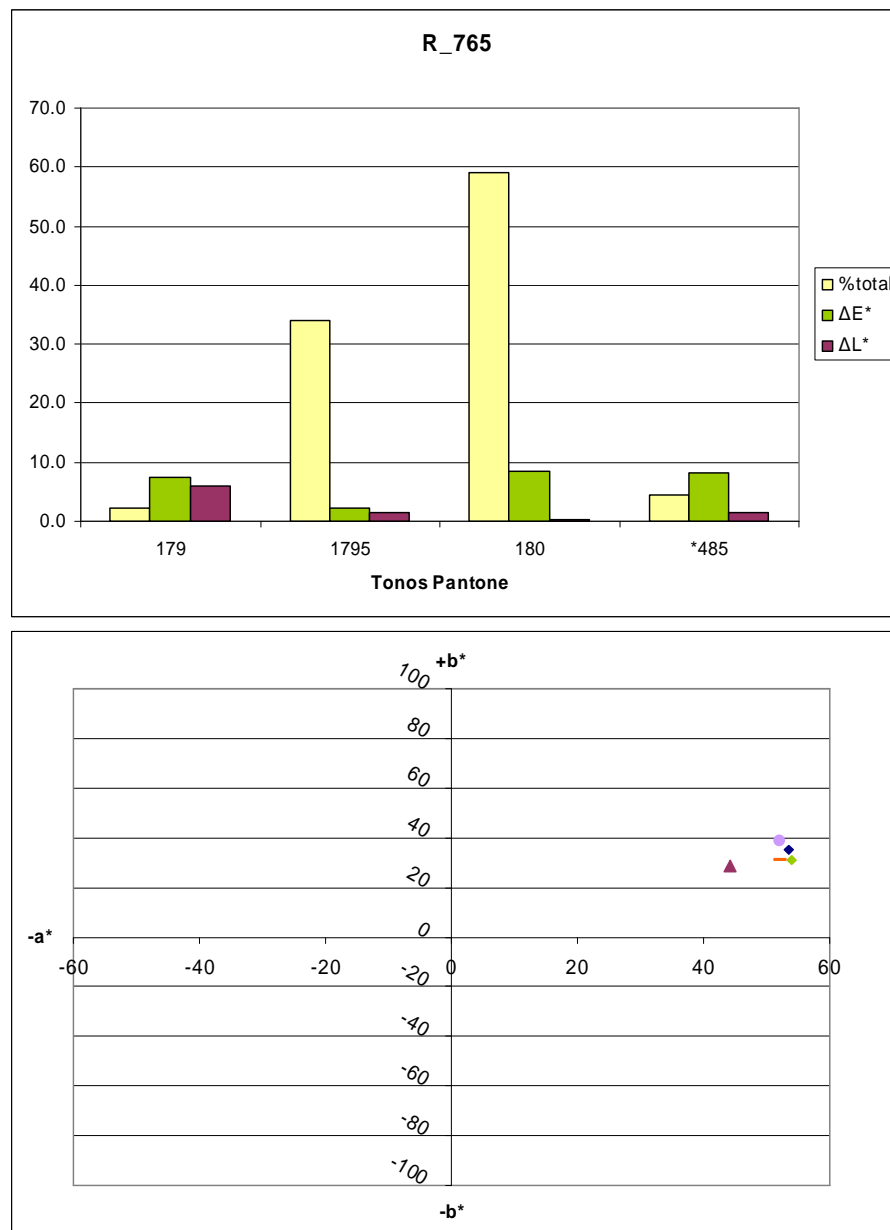
En este rojo, podemos ver que el asterisco morado se encuentra bastante alejado de los demás, es uno de los casos en los que el *Color Cue* no ha identificado nada bien el tono Pantone, esto lo observamos en la gráfica de barras, el tono 1788*, deja ver que es el que mayor ΔE^* presenta y ningún observador lo ha elegido

Los observadores han coincidido en que el color más parecido de las guías Pantone es el de menor ΔE^* . En la gráfica superior el 186 y en la inferior el triángulo verde.

En cuanto a la ΔE^* y ΔL^* , observamos que están bastante cercanas al 0, y en el 186 por lo que el Pantone 186 es el tono mas parecido. La mayoría de los observadores también lo piensan.

- ΔE^* : 0.95 → No hay diferencia visual.
- Observadores: 40.9% → Coinciden con el menor ΔE^* .
- Color Cue: Mala aproximación → Valor con mayor ΔE^*

- **R765**



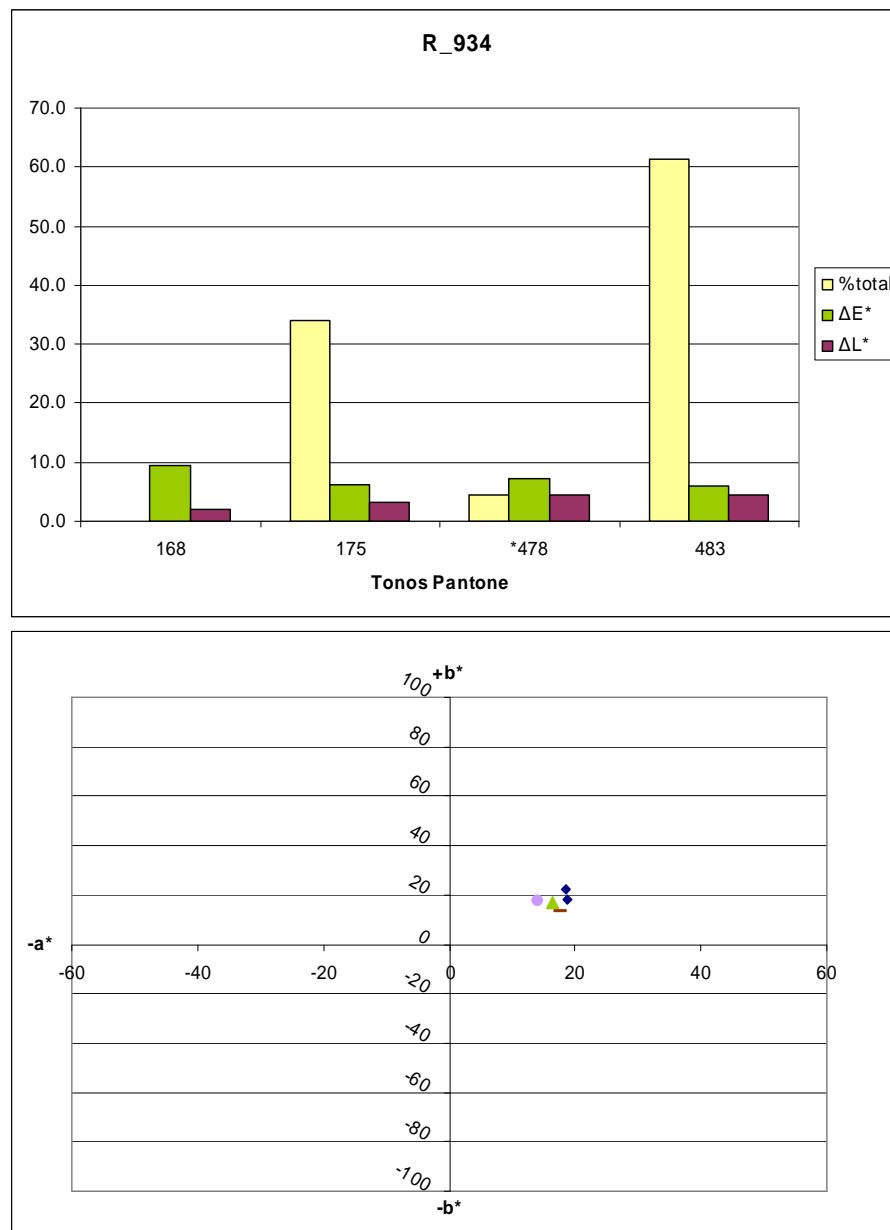
Se observa al igual que en la gráfica anterior, que el valor elegido por el *Color Cue* es uno de los más lejanos a la muestra. Podemos pensar pues, que con los tonos rojizos, este no hace una buena aproximación.

Casi el 35% de los observadores, coincide con que el tono mas parecido es el Pantone 1795 (que es el de menor ΔE^* , rombo verde).

La gran mayoría, el 58.7% opina que el más parecido es el Pantone 180 (triangulo berenjena), que es el más alejado de todos, pero a su vez es el que tiene la ΔL^* más cercana al 0, casi no hay diferencia en la luminosidad de ambas muestras.

- ΔE^* : 2.28 \rightarrow No hay diferencia visual.
- Observadores: 59.1% \rightarrow Coinciden con el menor ΔL^* , y con el 2º menor ΔE^* .
- Color Cue: Mala aproximación \rightarrow Valor con ΔE^* elevado.

- R934

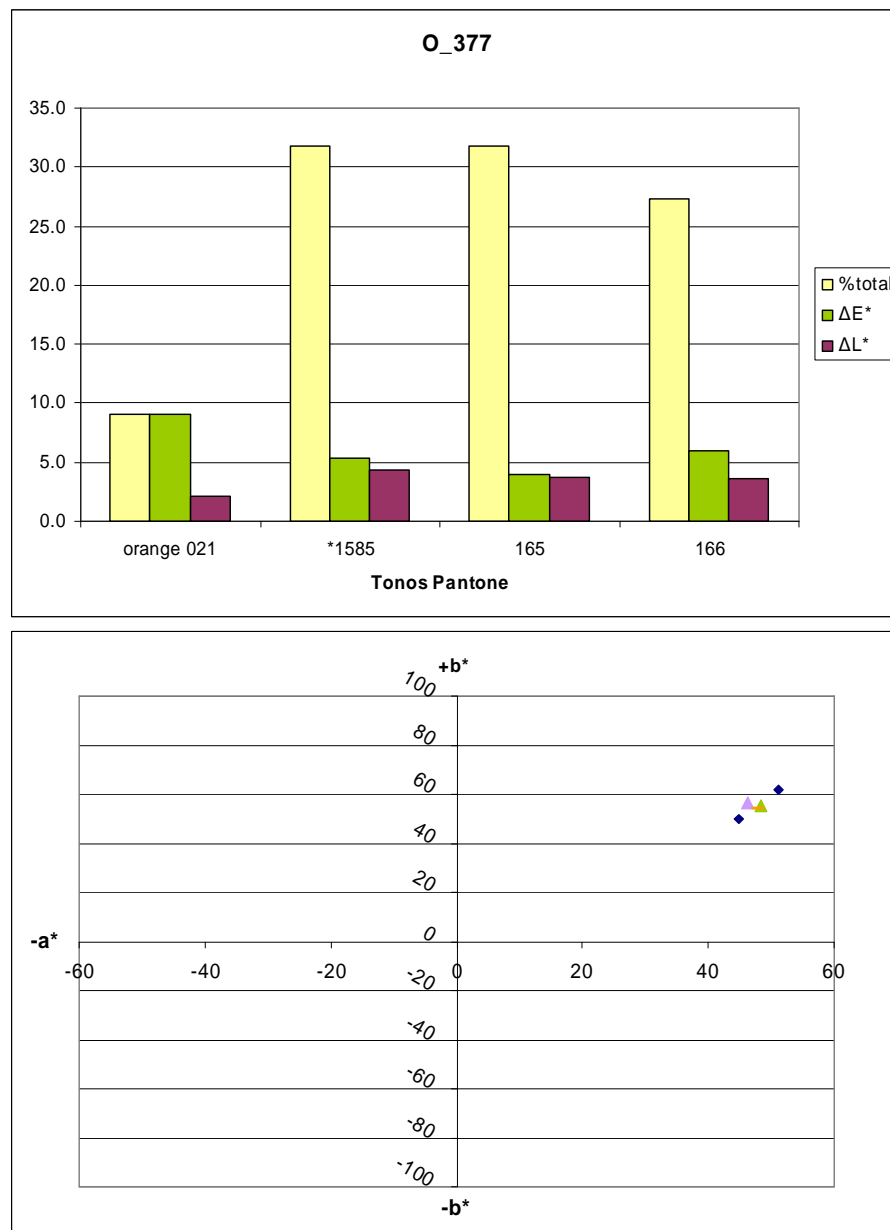


La gran mayoría de los participantes aciertan en la elección del Pantone 483, ya que este es, el que menor diferencia cromática presenta (triángulo verde).

Una vez más, el Color Cue no determina bien cual es el tono de menor ΔE^* , pero por lo menos no nos da el resultado del tono más dispar (en este caso el Pantone 168).

- ΔE^* : 5.84 \rightarrow No hay diferencia visual.
- Observadores: 61.4% \rightarrow Coinciden con el menor ΔE^* .
- Color Cue: Mala aproximación

- O377

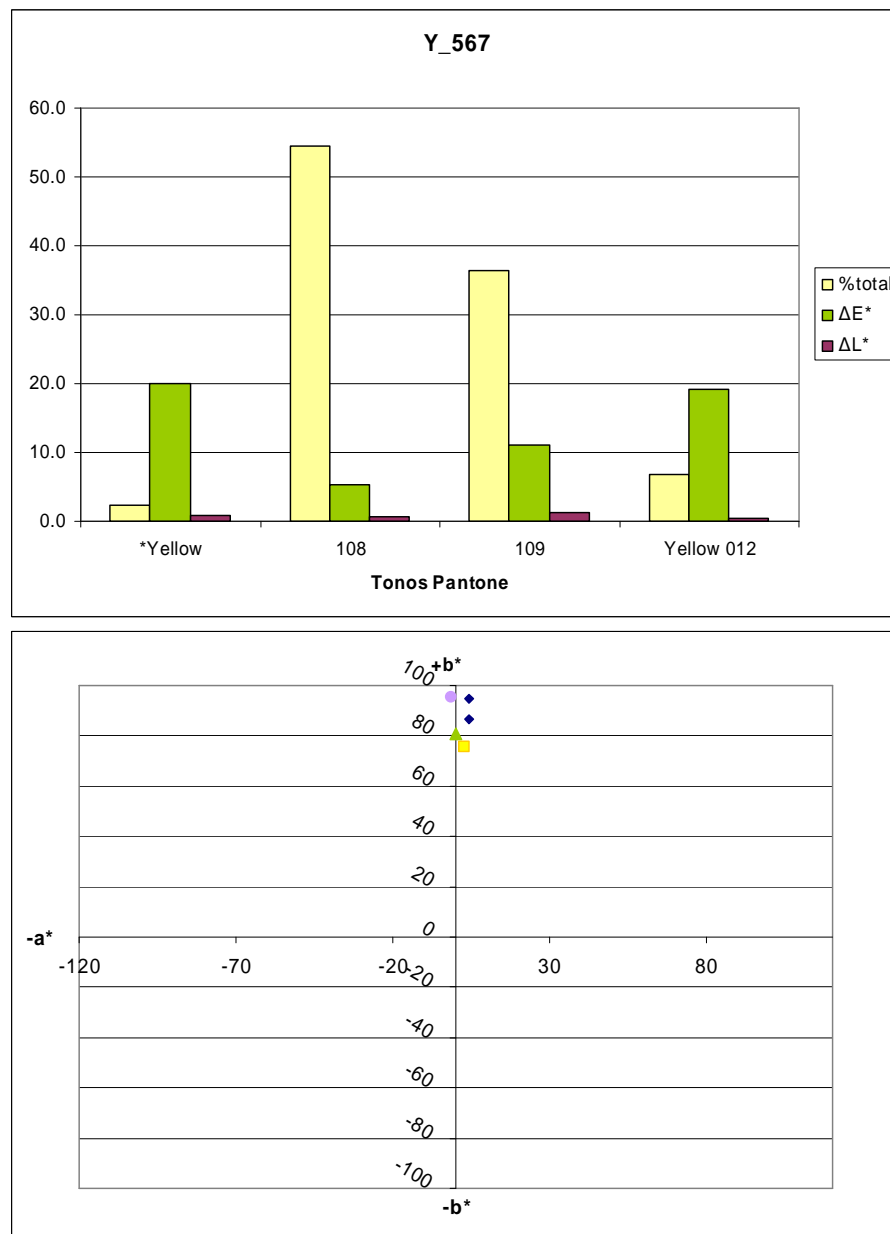


En cuanto al naranja, podemos observar que existe un empate entre la mayoría de los observadores con el resultado del Color Cue (triángulo morado), y con el de menor valor de ΔE^* (triángulo verde, Pantone 165).

Quitando el Pantone orange 021, la elección del tono ha estado bastante reñida.

- ΔE^* : 3.98 \rightarrow Diferencia visual pequeña.
- Observadores: 31.8% \rightarrow Coinciden con el Color Cue y con el valor de menor ΔE^* .

- **Y567**

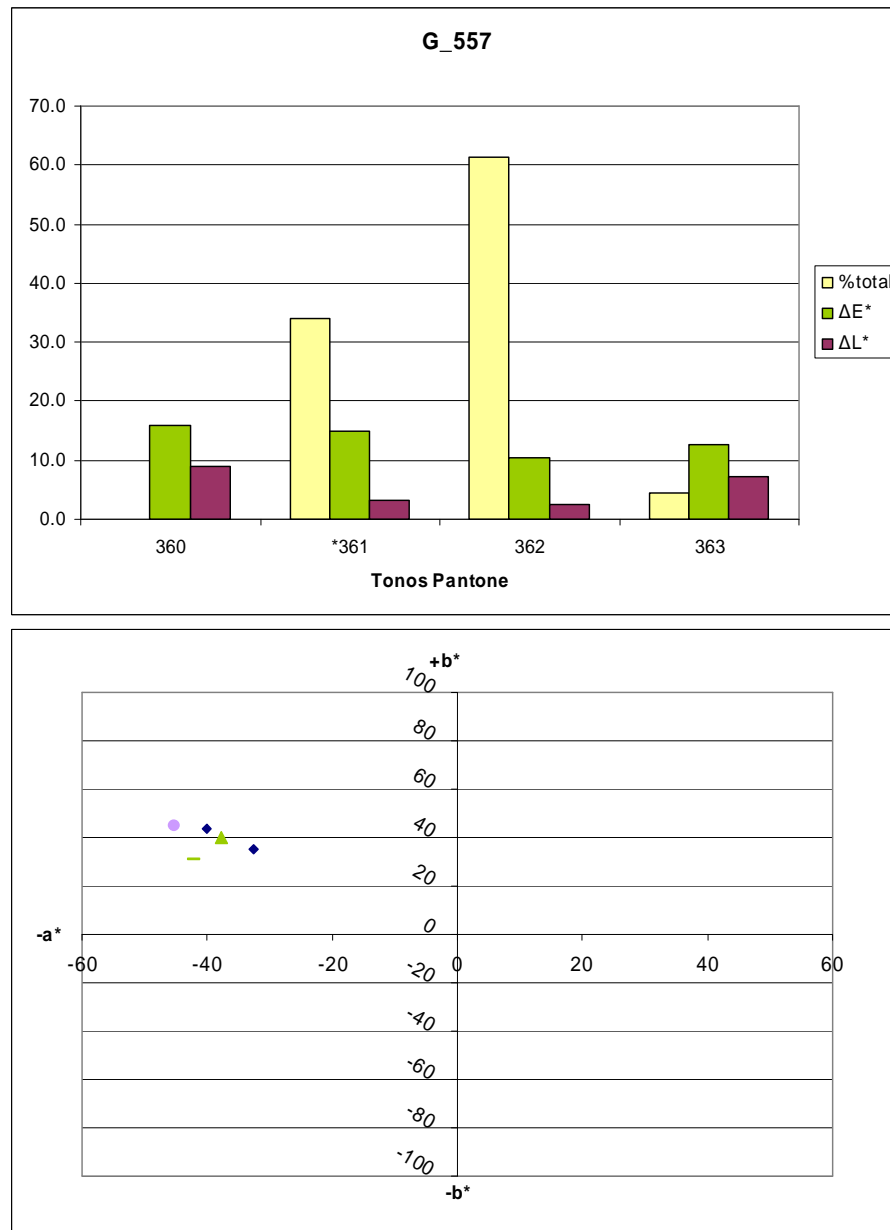


El amarillo, es uno de los colores que antes se ha saturado conforme añadíamos una capa encima de otra, por lo que las muestras presentan una mínima ΔL^* entre ellas. Los observadores han estado bastante acertados en cuanto a su elección, debido a que coinciden con el menor valor de ΔE^* .

El color Cue, vuelve a no afinar, eligiendo el tono con mayor ΔE^* de todos los posibles

- ΔE^* : 5.38 \rightarrow Diferencia visual pequeña.
- Observadores: 54.5% \rightarrow Coinciden con el menor ΔE^* .
- Color Cue: Mala aproximación \rightarrow Mayor valor de ΔE^* y solo un 2.2% de los observadores.

- G557



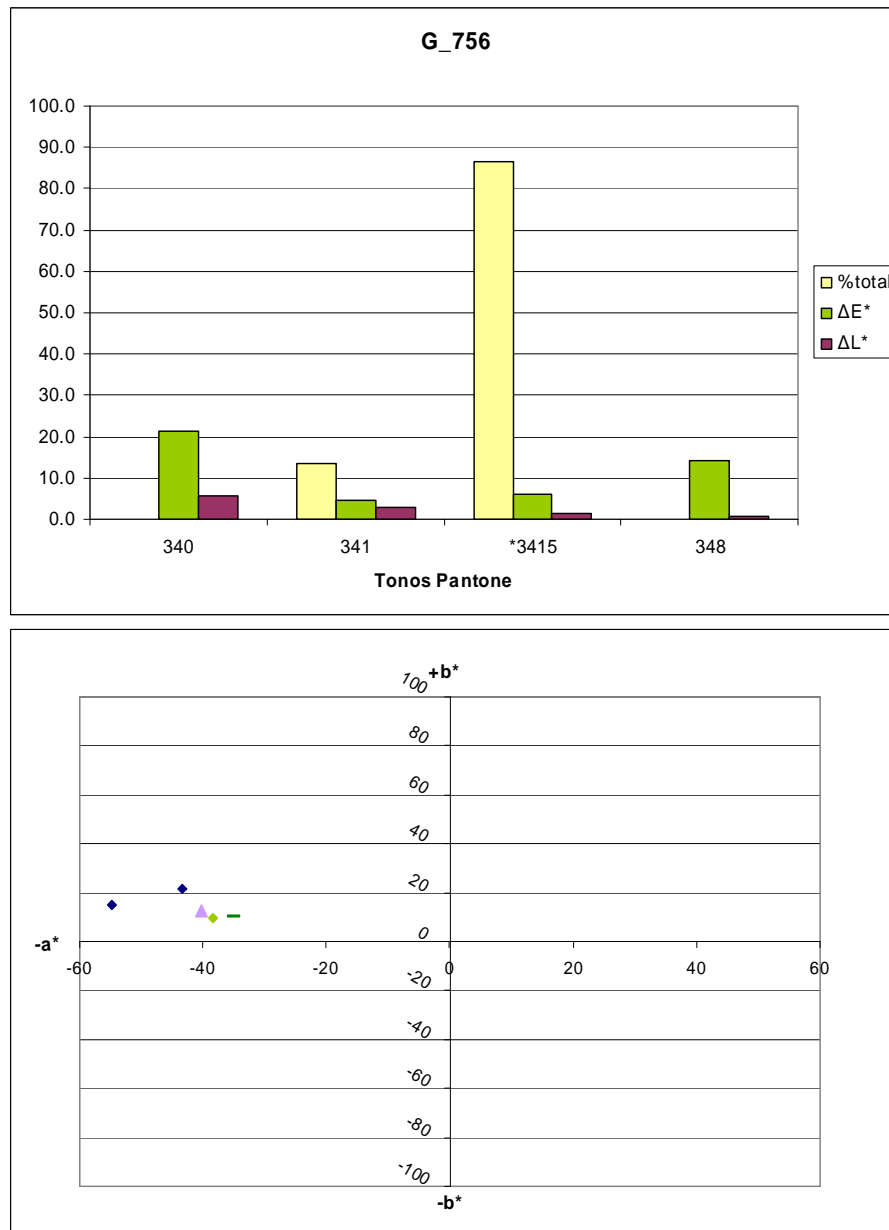
Este verde clarito (al igual que el oscuro), ha resultado ser uno de los pocos rotuladores que en el estudio preliminar, coincidía el tono ofrecido por el Color Cue, con el de la mayoría de los 16 observadores (ahora con el 35%, pero no con la mayoría)

EL 60% de los observadores, coincide con el valor más cuantitativo que tenemos, el ΔE^* , que aún así es bastante elevado; 10.38. También coincide con el menor ΔL^* .

Podríamos decir, que los rotuladores verdes (en su máximo de saturación), no reproducen demasiado bien los colores presentes en las guías Pantone, debido a los elevados valores de ΔE^* .

- ΔE^* : 10.38 → Existe diferencia visual.
- Observadores: 61.4% → Coinciden con el menor ΔE^* .
- Color Cue: Aproximación regular → Debido que un 34.8% opina igual que el.

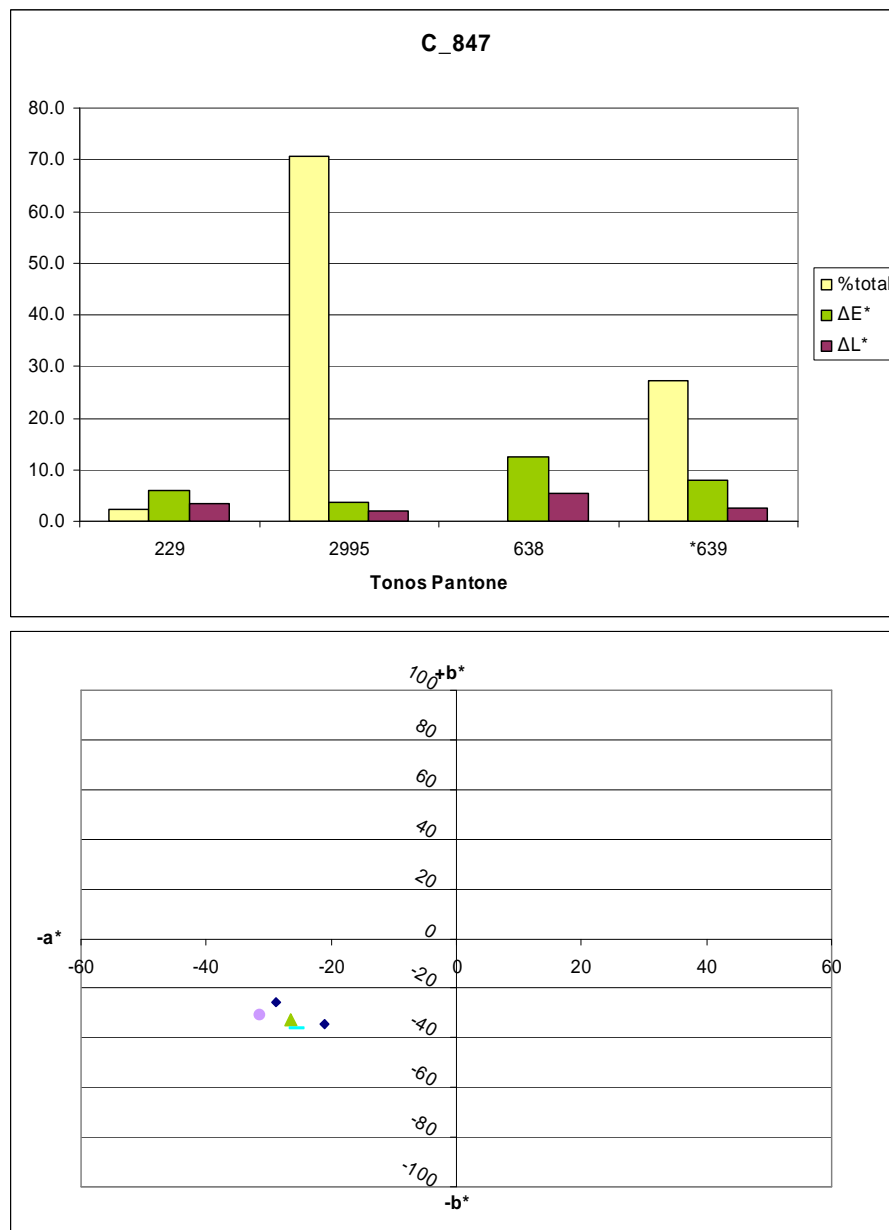
- **G756**



Al igual que en el estudio preliminar, los observadores y el Color Cue (triángulo morado), se ponen de acuerdo para mostrar el mismo resultado (Pantone *3415), que aunque no posee el menor ΔE^* , si que tiene el siguiente valor más cercano al 0 en cuanto a diferencia de luminosidad se refiere.

- ΔE^* : 4.55 \rightarrow Existe diferencia visual.
- Observadores: 86.4% \rightarrow Coinciden con el Color Cue y con el menor Δh .
- Color Cue: Aproximación regular \rightarrow Aunque un 84.8% opina igual que el, y coincide con el segundo menor valor de ΔE^* .

- C847

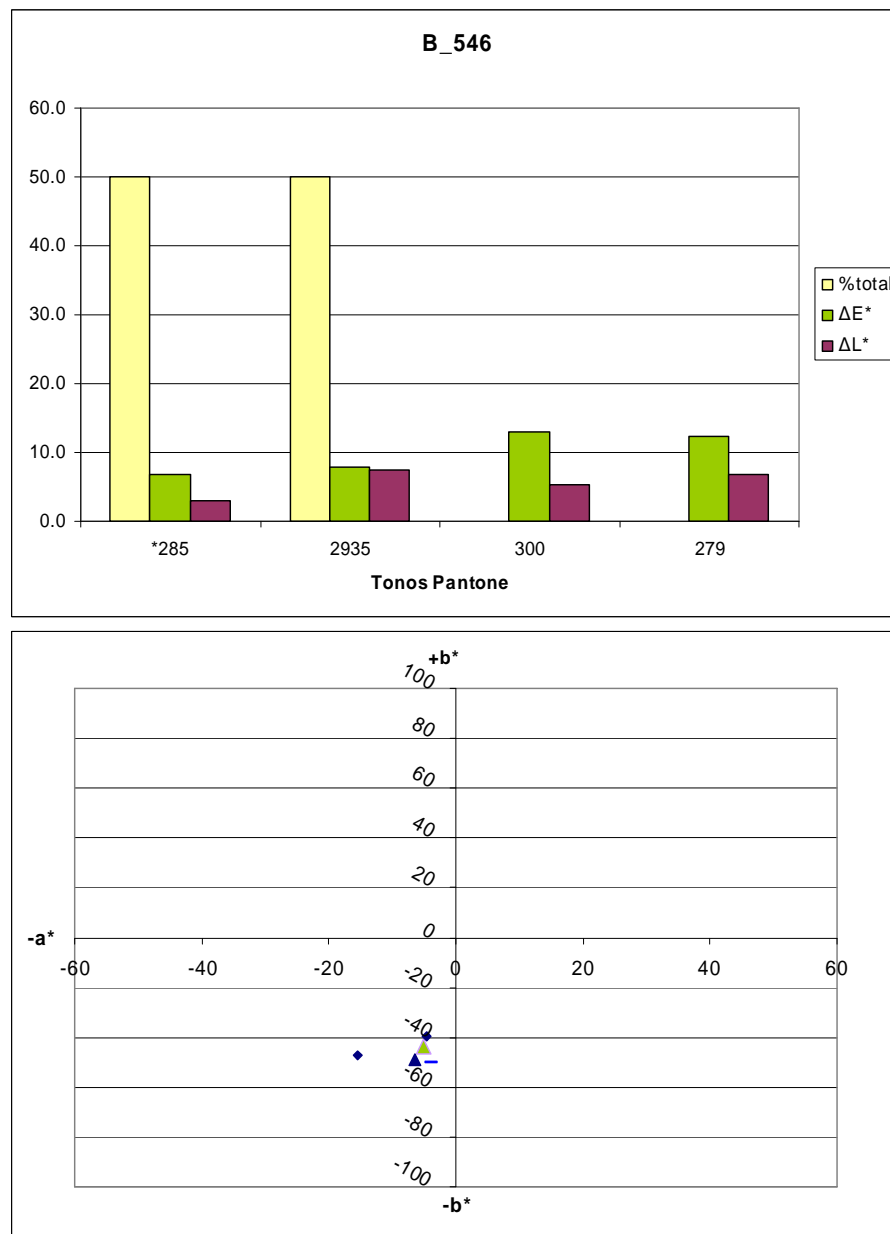


Los observadores han estado acertados en cuanto a la elección del tono Pantone 2995, ya que este es el que presenta las menores diferencias cromáticas de todos (triángulo verde).

El color Cue, en cambio, no ha marcado igual que la mayoría, pero si con el segundo tono más votado, el *639 y con el segundo ΔE^* mas pequeño.

- ΔE^* : 3.69 \rightarrow Existe una mínima diferencia visual.
- Observadores: 70.5% \rightarrow Coinciden con el menor ΔE^* .
- Color Cue: Aproximación regular \rightarrow Aunque el resto de los observadores, han elegido el mismo tono que el.

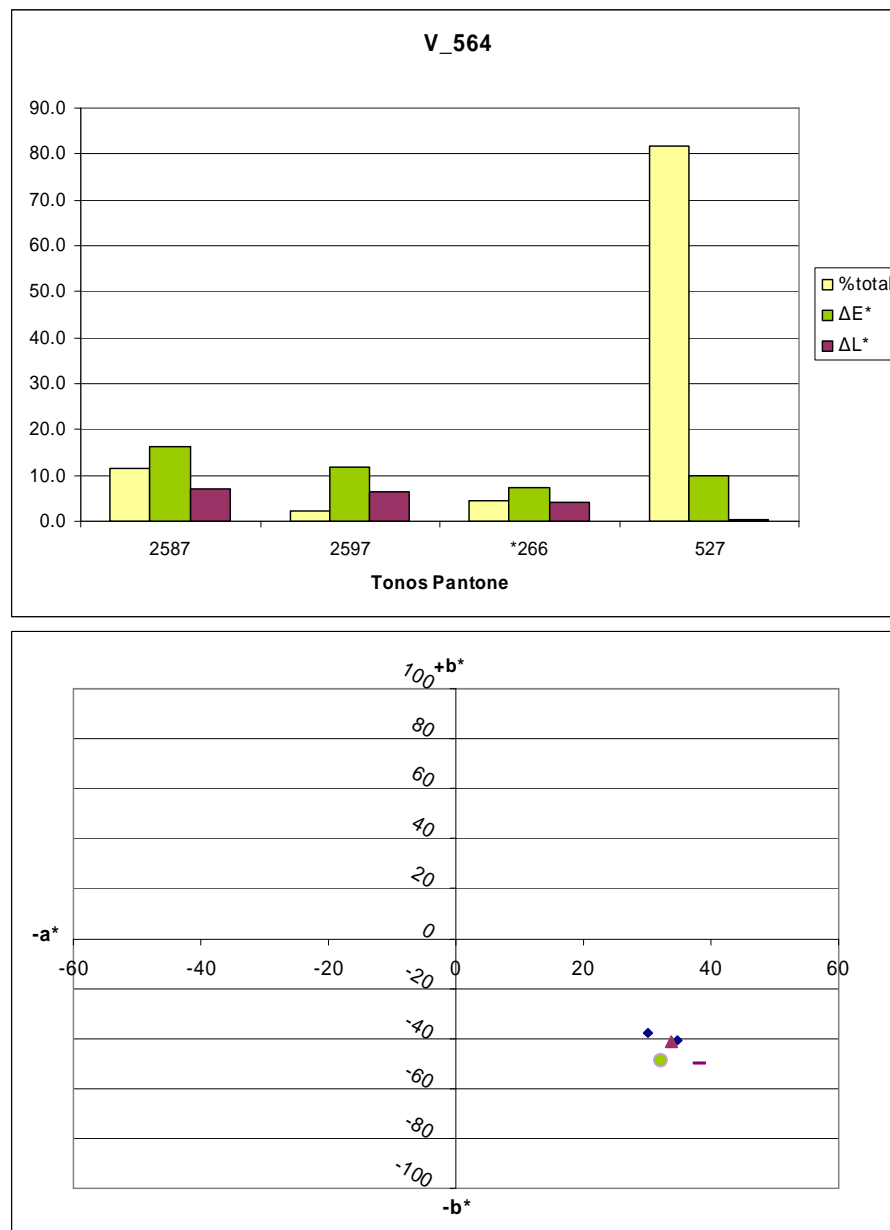
- **B564**



Este azul oscuro, es uno de los pocos colores en los que más han coincidido las diferentes opciones del test, puesto que observadores, colorímetro y valor ΔE^* , coinciden en un mismo tono, el Pantone 285 (triángulo verde con borde morado), que es el punto blanco de la gráfica.

- ΔE^* : 6.81 \rightarrow Existe diferencia visual.
- Observadores: 50% \rightarrow Coinciden con el menor ΔE^* y con el *Color Cue*.
- Color Cue: Buena aproximación \rightarrow Coincide con la mayoría de los observadores, y con el menor ΔE^* .

- V564

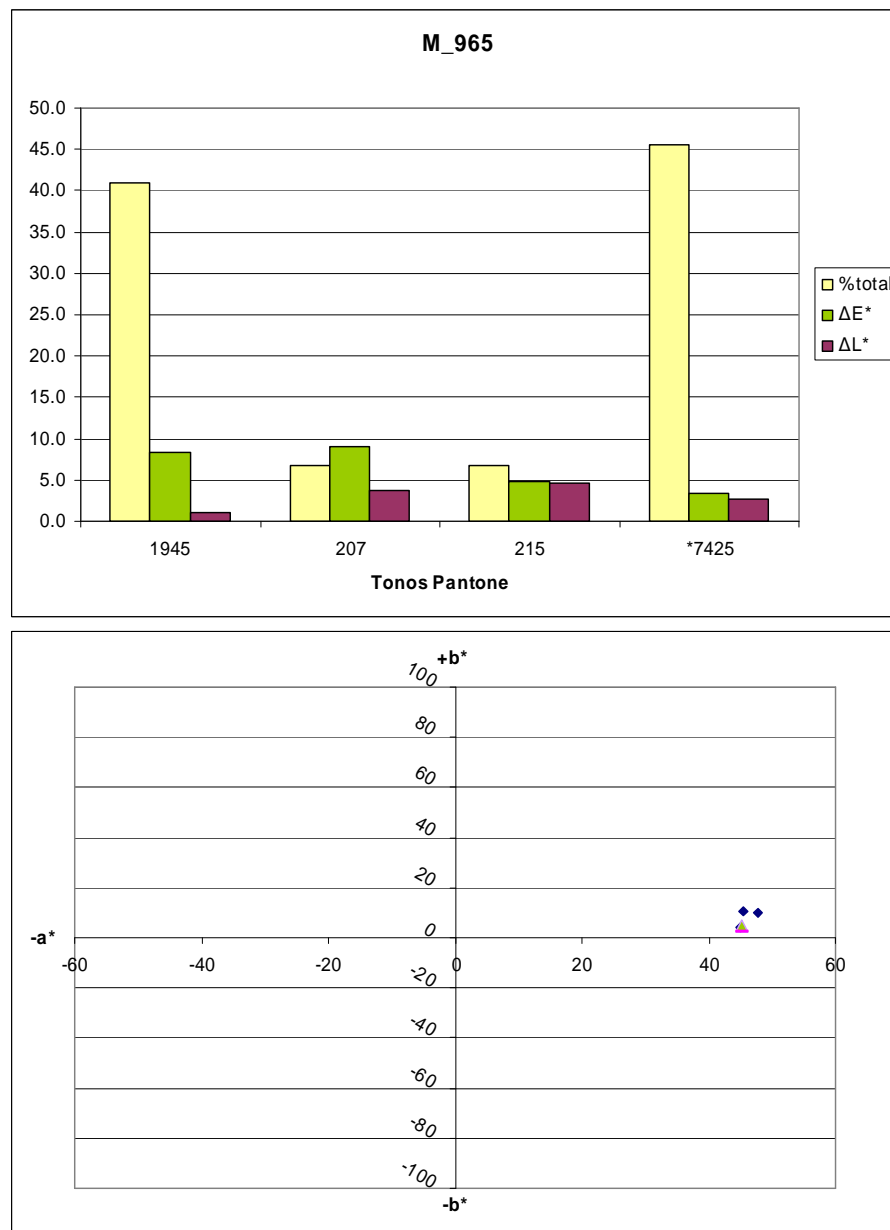


Con el Violeta, el colorímetro coincide con la menor ΔE^* medido, pero casi un 82% de los observadores coincide en que el tono más parecido es el Pantone 527, que es el siguiente tono con el menor ΔE^* .

De hecho, este tono, es el que tiene la menor ΔL^* . Al igual que el rotulador R765 y G765, la mayoría de los observadores se ha decantado por el tono con menor diferencia en cuanto a claridad o luminosidad.

- ΔE^* : 7.21 → Existe diferencia visual.
- Observadores: 81.8% → No coinciden ni con el ΔE^* , ni con el Color Cue.
- Color Cue: Buena aproximación → Coincide con el menor ΔE^* .

- **M965**

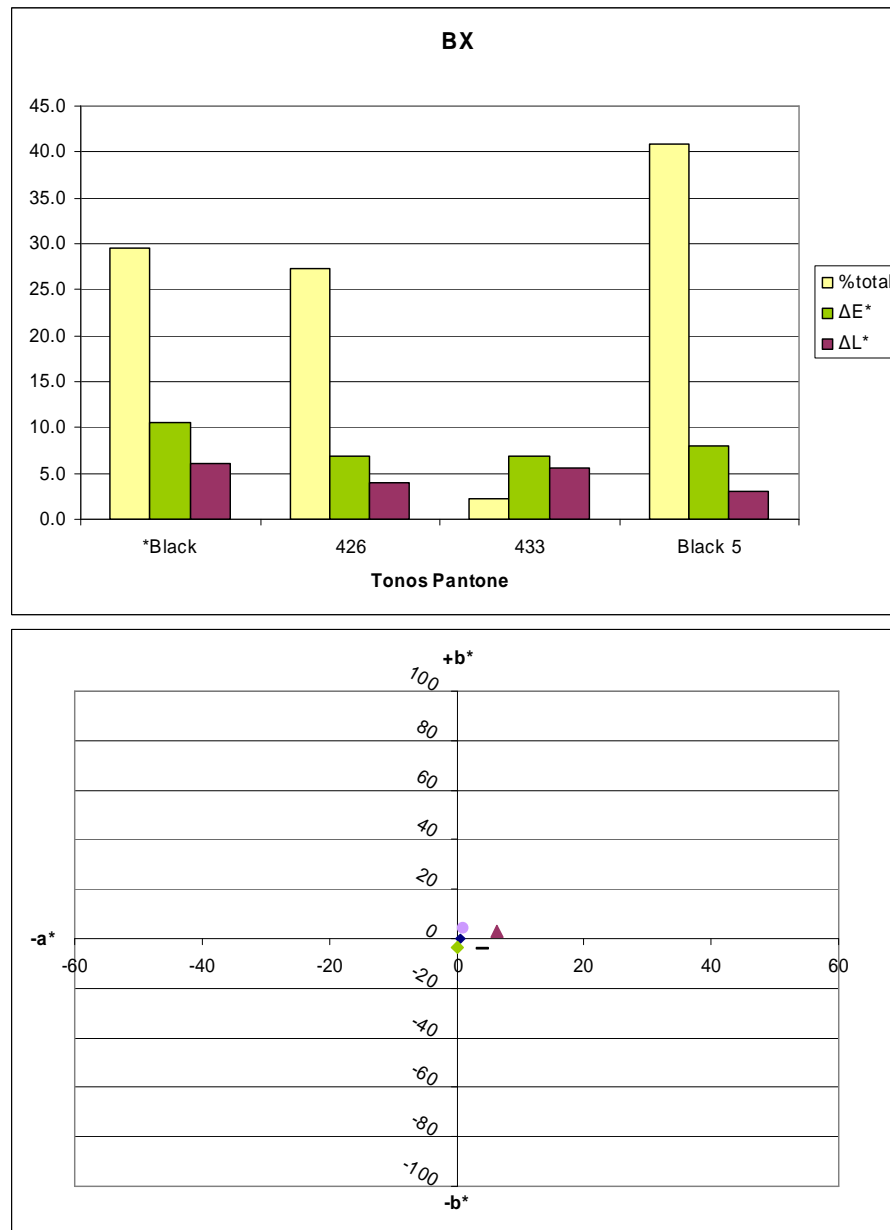


El magenta, es otro de los pocos que consiguen coincidir en todos los aspectos que estamos evaluando. El resultado del colorímetro, coincide con el de la mayoría de los observadores y estos a su vez, con el tono de menor ΔE^* (triángulo verde con borde morado).

Este rotulador, reproduce muy bien los tonos Pantone

- ΔE^* : 3.37 → Mínima diferencia visual.
- Observadores: 45.5% → Igual que el Color Cue y menor ΔE^*
- Color Cue: Buena aproximación → Coincide con el menor ΔE^* y mayoría de observadores.

- **BX**



El color, negro, ha sido uno de los más difíciles a la hora de evaluarlo, debido a que la muestra de rotulador, no se parecía demasiado a los diferentes tonos Pantone. De ahí que los porcentajes de elección hayan estado bastante repartidos.

El *Color Cue* se ha decantado por la muestra de mayor ΔE^*

La mayoría de los observadores se decantan por el tono Black 5, que es el que tiene la menor diferencia de croma respecto a la muestra XB.

- ΔE^* : 6.86 → Mínima diferencia visual.
- Observadores: 40.9% → Coinciden con el menor ΔC^* .
- Color Cue: Mala aproximación → Muestra con mayor ΔE^* .

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos para las 12 muestras de rotulador, cada una en su máximo de saturación

Color	ΔE^*	Color Cue	Observadores
R465	186	1788	186
R765	1795	485	180
R934	483	478	483
O377	165	1585	1585 y 165
Y567	108	Yellow	108
G557	362	361	362
G756	341	3415	3415
C847	2995	639	2995
B546	285	285	285 y 2935
V564	266	266	527
M965	7425	7425	7425
XB	433	Black	Black 5

En la primera columna, tenemos los 12 colores de los rotuladores, en la segunda el tono Pantone con menor ΔE^* respecto de la muestra de rotulador, en la tercera, el resultado que el colorímetro Color Cue muestra como tono Pantone Solid mate mas aproximado a cada muestra y en la última columna, de 46 observadores, el tono que la mayoría han elegido como tono más parecido a la muestra.

El valor de ΔE^* , es el valor más exacto que tenemos, para verificar cual de los tonos Pantone es el que mantiene una menor deferencia cromática con respecto a la muestra.

En segundo lugar, tendríamos la valoración de los 46 observadores, que están de acuerdo en 7 de los 12 colores con el mínimo valor de ΔE^* (valores en negrita) y en 4 de los 12 valores que ofrece el Color Cue (los subrayados).

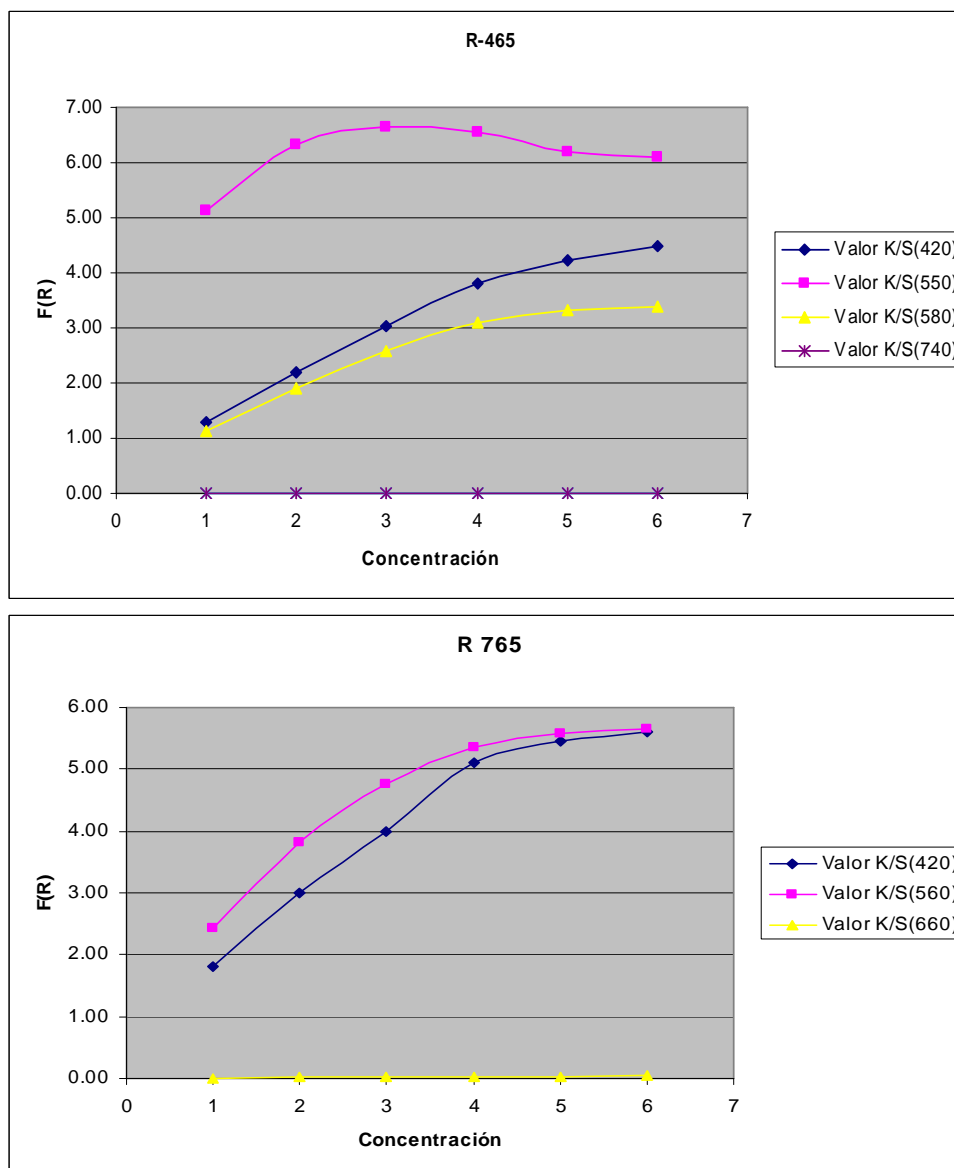
De esto podemos observar, que el Color Cue, no es para nada un colorímetro demasiado fiable a la hora de determinar cual es el tono Pantone más parecido a una muestra de color, por lo menos en cuanto a los rotuladores *Tria de Letraset* se refiere.

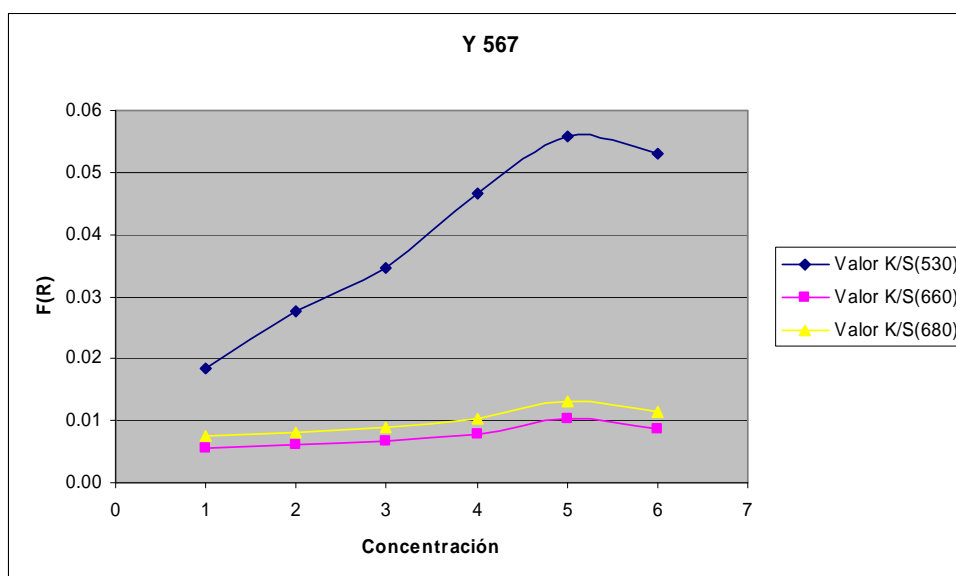
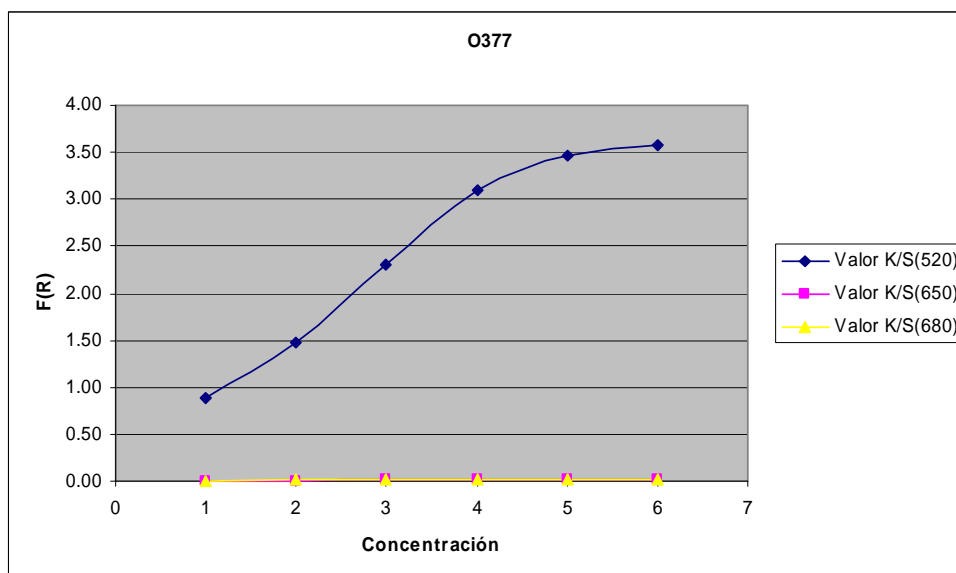
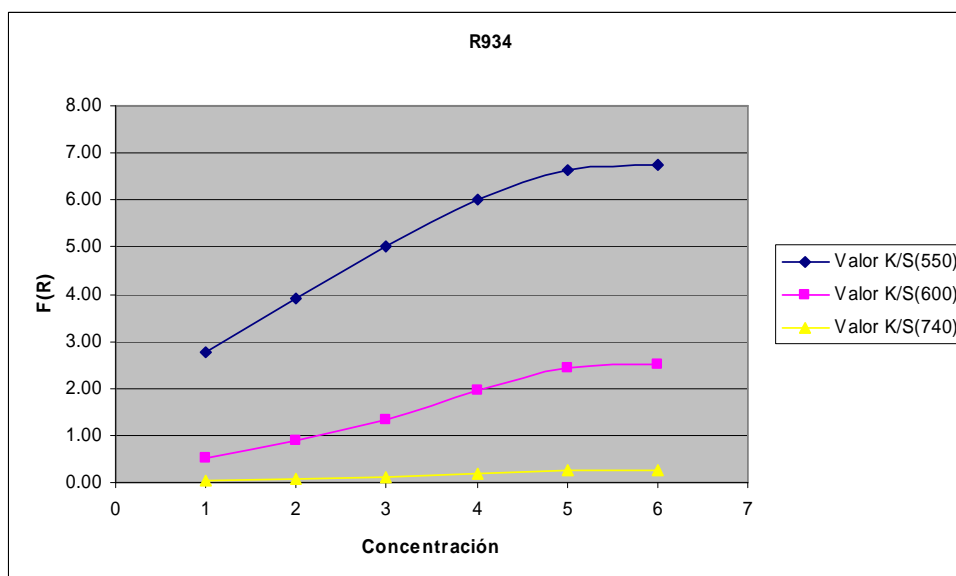
Queda también demostrado, que los observadores son ‘sabios’ a la hora de elegir un tono u otro, debido a que en la mayoría de los casos han elegido el tono con menor ΔE^* . Aunque también hay casos (tres para ser exactos), en los que los observadores no se decantan por el tono con menor ΔE^* , pero sí con el tono que tiene la menor ΔL^* , es decir, con el tono mas parecido en cuanto a claridad. Esto parece que compensa el hecho de que la diferencia de color sea menor en otra muestra y que no salga elegida.

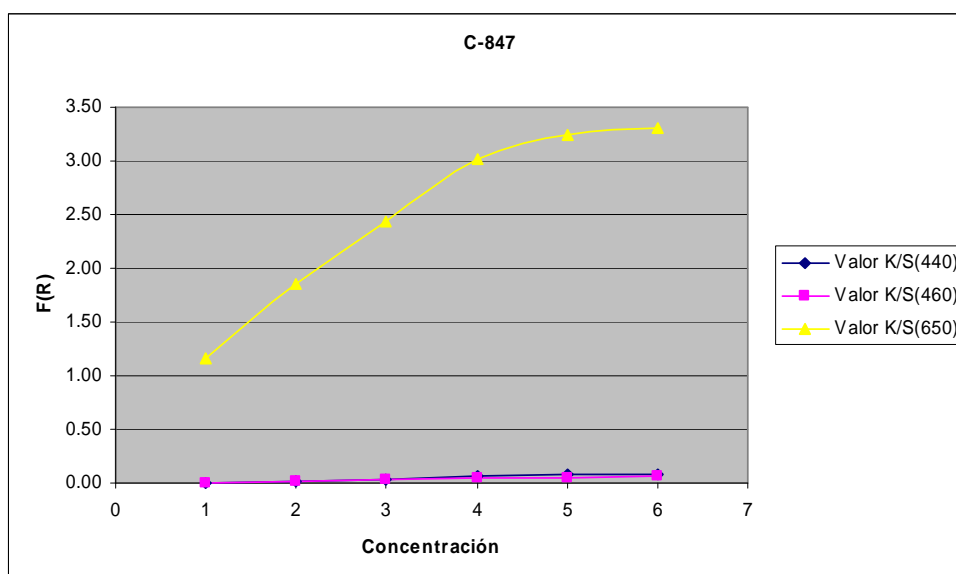
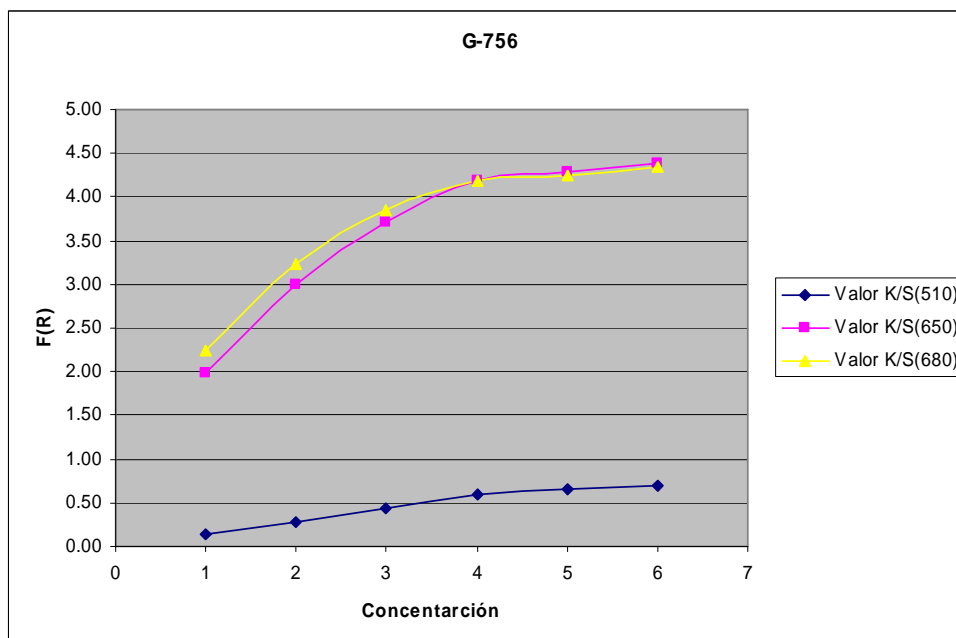
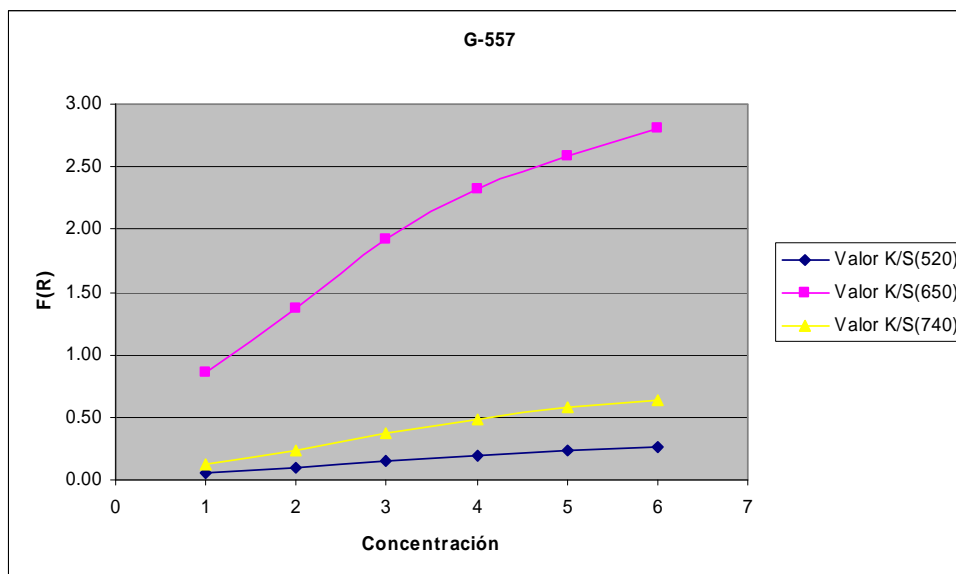
Así pues, concluimos este test, con los diferentes tonos Pantone que los observadores han elegido como colores pantone más parecidos al set de rotuladores *Bright Colours de Tria* cuando estos están al máximo de saturación.

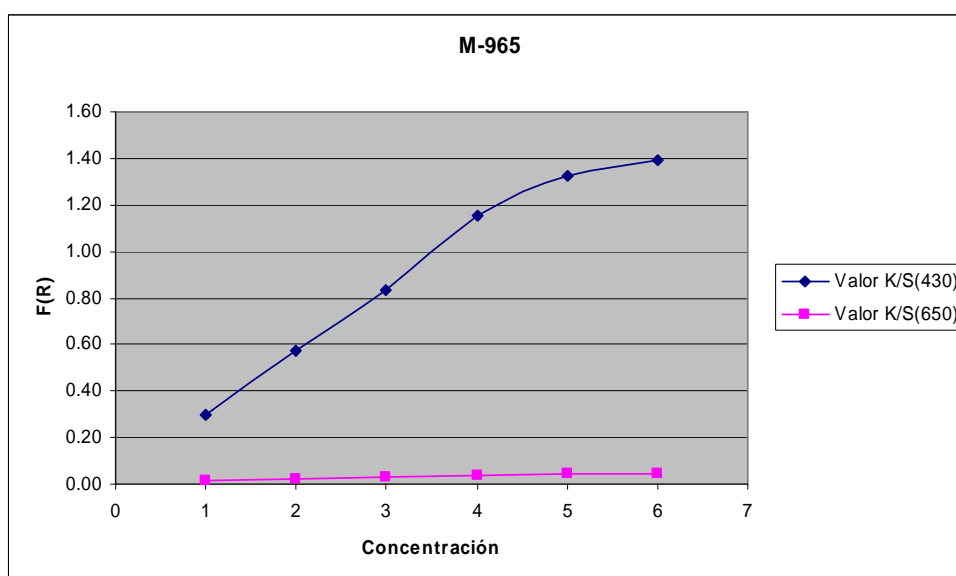
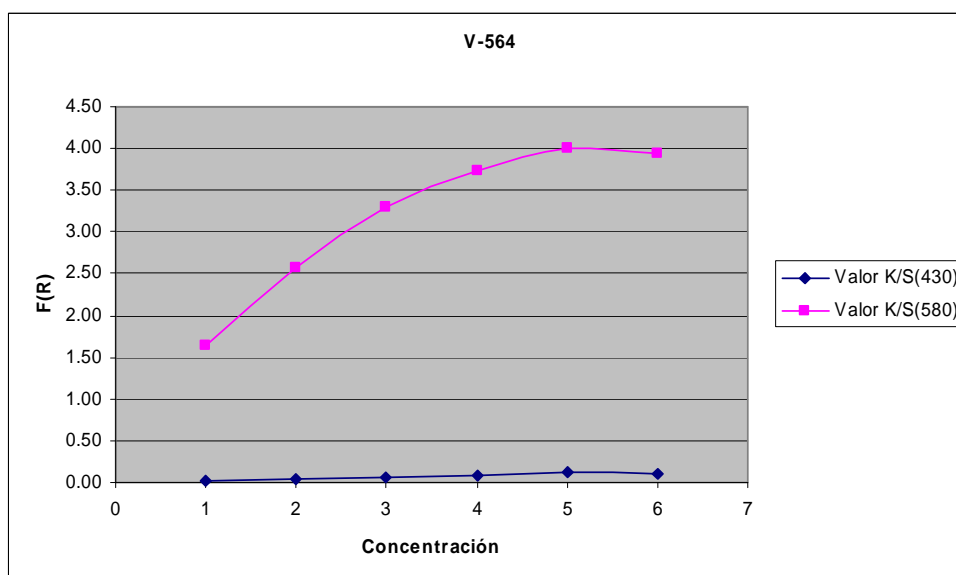
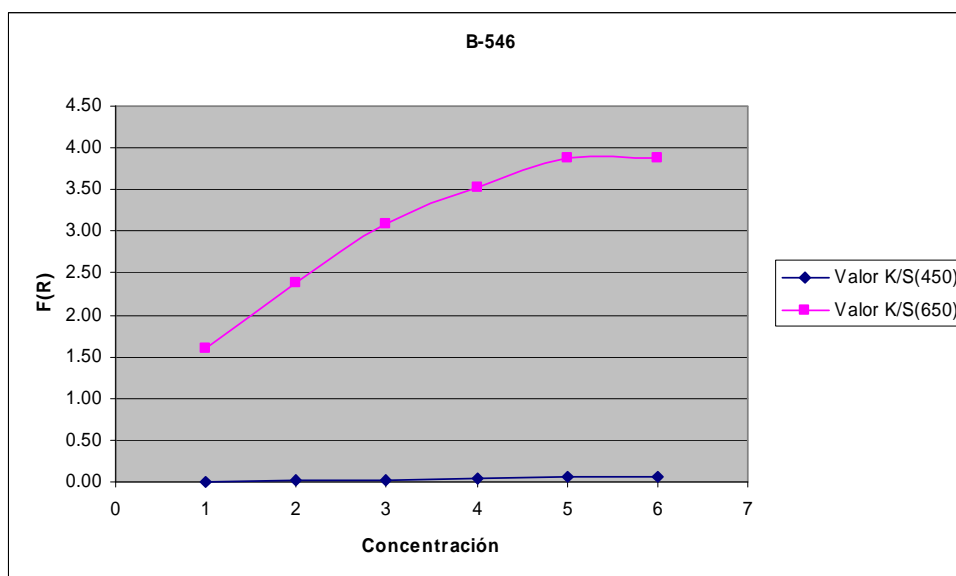
4.3.4. Evolución de los Valores K/S con el número de capas

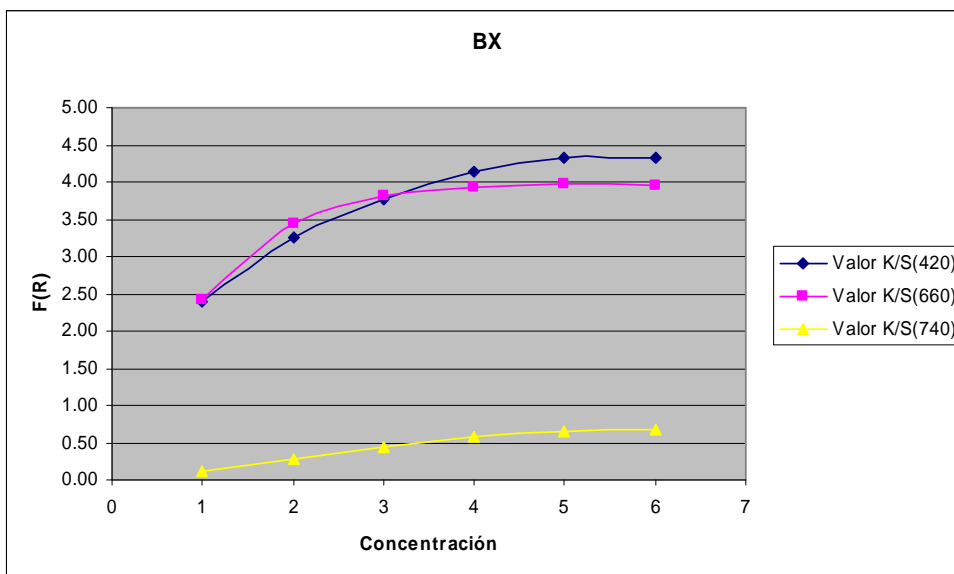
Con las longitudes de onda elegidas en las gráficas de reflectancia (apartado 4.3.1), pasamos a evaluar los valores K/S en esas longitudes de onda (aproximadas, puesto que algunas han podido variar un poco), para ver la evolución de los mismos, a medida que aumenta el número de capas.











Evaluación:

Observando las diferentes gráficas de los valores de K/S frente a la concentración, se ve que existe una linealidad entre la función $F(R)$ y la concentración del colorante.

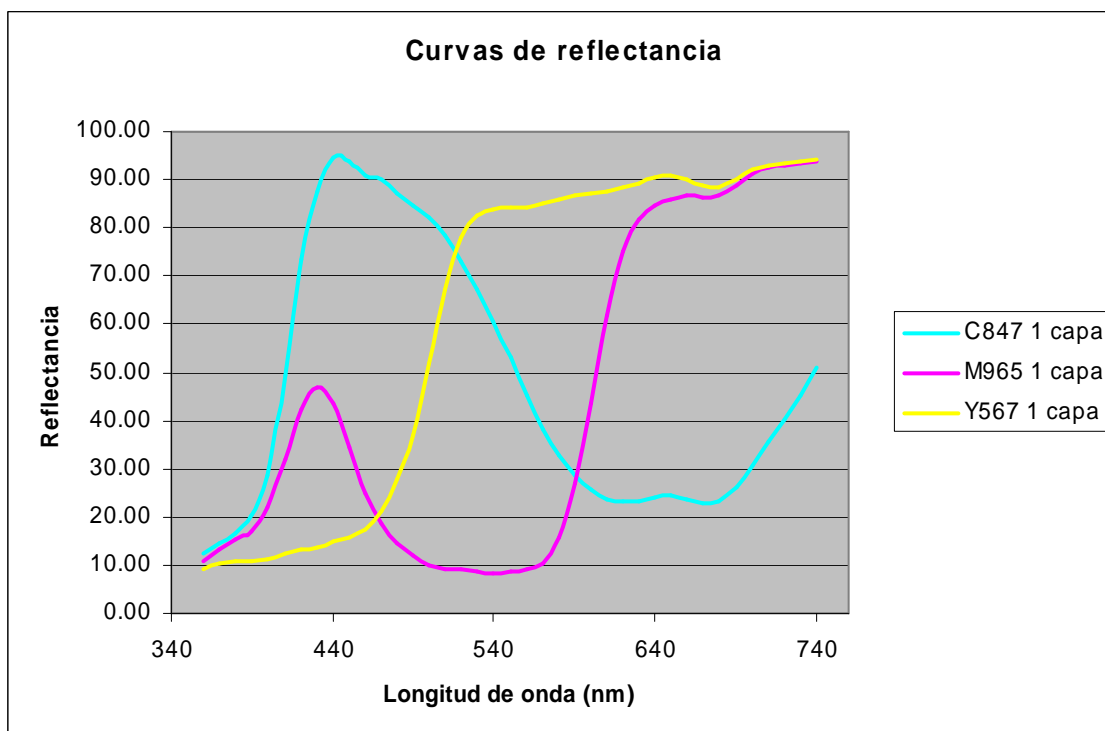
Se ve claramente, que el color se satura a partir de 3,4 o 5 capas de rotulador, ya que se pierde la linealidad de las mismas. Por ello la 6ª capa tendrá un valor parecido al de la 5ª y esta al de la 4ª. Las longitudes de onda que no mantienen esta linealidad, es porque son menos características del propio color que estamos analizando.

Se pueden los resultados al igual que con el ΔE^* del apartado 4.3.2. En cambio, en el análisis de las gráficas de reflectancia, uno no se puede hacer la idea de que ΔE^* tienen las capas adyacentes, es decir, si este va a ser grande o pequeño. Aquí, en estas gráficas si que nos hacemos una idea de cuando llega el momento de la saturación de cada color.

4.3.5. Predicción del color de una mezcla a partir de la combinación de los valores K/S de sus concentraciones (2 métodos)

- **1º método: Procedimiento para sacar las 3 concentraciones de los tres colorantes (C_c , C_m , C_y):**

Lo primero de todo es elegir las longitudes de onda características de cada color, para ello, disponemos de las curvas de reflectancia de los tres colores a utilizar en las mezclas, para el caso de una única capa de rotulador.



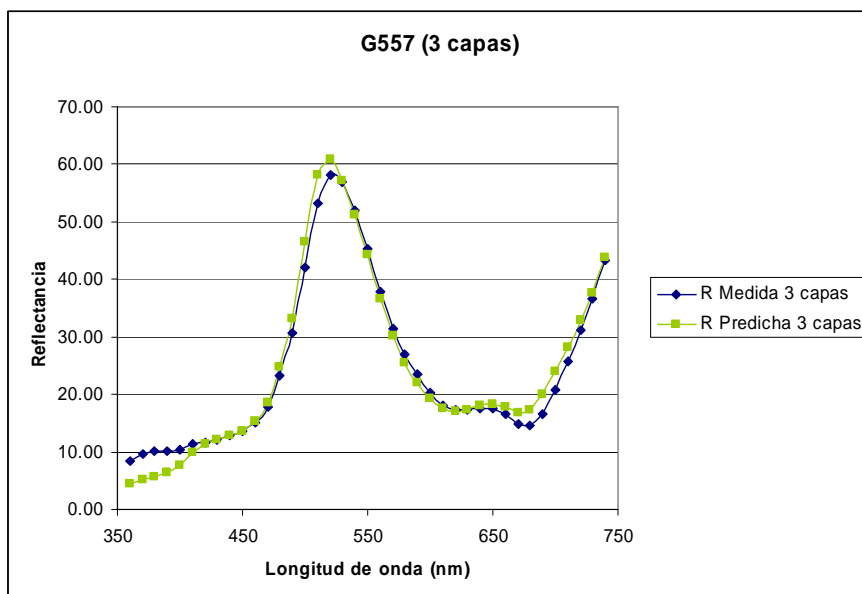
- Cyan → $\lambda_1 = 440\text{nm}$
- Magenta → $\lambda_2 = 630\text{nm}$
- Amarillo → $\lambda_3 = 530\text{nm}$

Se ha comprobado que las predicciones salen mejor si cogemos los valores k/s del magenta en **630nm** (en los rojizos), debido a que el amarillo y el cian, tienen los picos reflectancia bien diferenciados del resto de su espectro en unas longitudes de onda diferentes de la de 630nm. Como el magenta es un color formado por mezcla de azul y rojo y tiene dos zonas de reflectancia claramente diferenciadas como se puede observar en la gráfica superior, hay que elegir una de las dos zonas; en este caso se ha elegido la longitud de onda en 630nm.

K/S Tono a Igualar	k/s C847 λ_1	k/s M965 λ_2	k/s Y567 λ_3
C (λ_1) =2.95	0	0.36	2.46
M (λ_2) =0.16	1.26	0.02	0.01
A (λ_3) =1.97	0.08	4.42	0.02

A continuación se presentan las gráficas de reflectancia de los 5 colores igualados que se han elegido, de los cuales hemos sacado la curva de reflectancia espectral a partir de los coeficientes k/s multiplicados por las concentraciones calculadas previamente de cada colorante.

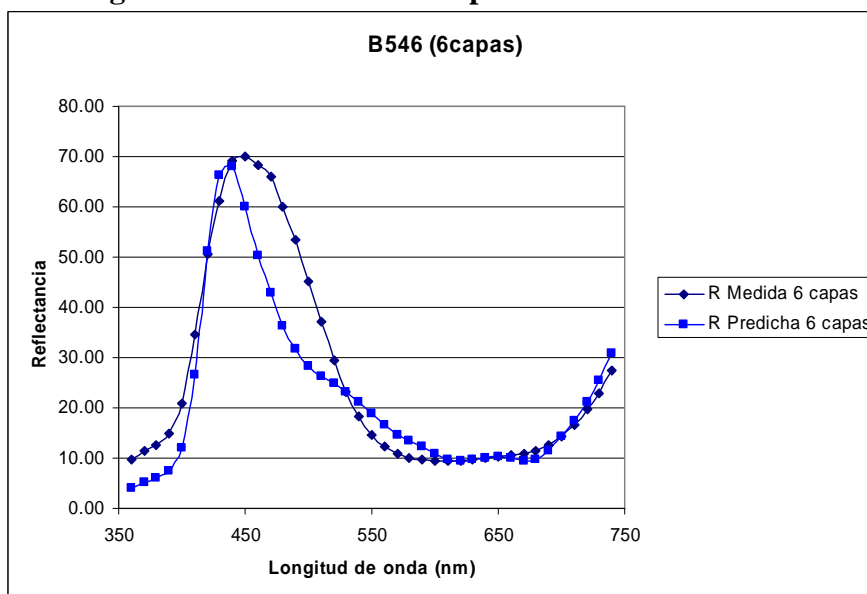
- Igualación del G557 de 3 capas:



G557 (3c)	Concentra.
CyanC1=	0.11
MagentaC2=	0.44
AmarilloC3=	1.14

G557 (3c)	L*	a*	b*	ΔE*
R. Medida	66.90	-42.14	33.21	3.01
R. Predicha	67.04	-45.08	32.61	

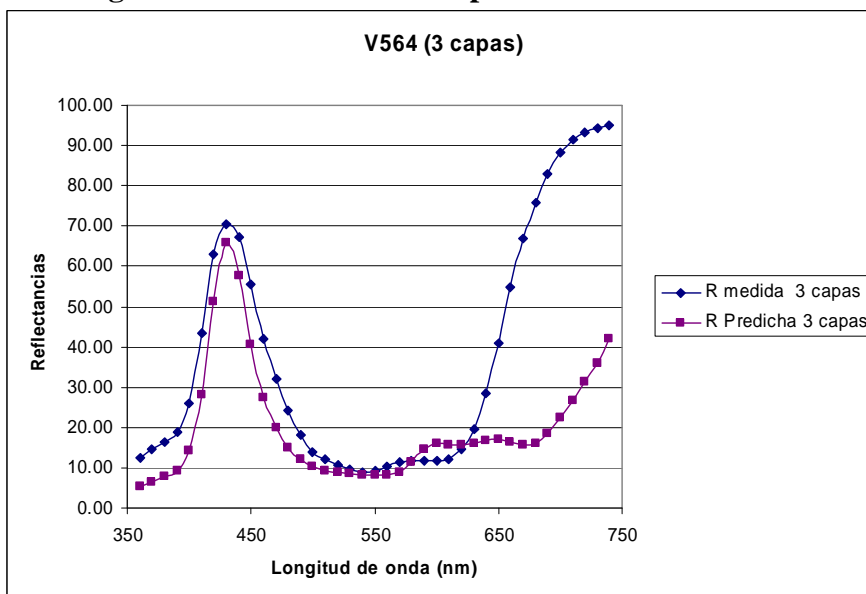
- Igualación del B546 de 6 capas:



B546 (6c)	Concentra.
CyanC1=	3.34
MagentaC2=	0.21
AmarilloC3=	0.00

B546 (6c)	L*	a*	b*	ΔE*
R. Medida	54.32	-3.94	-50.13	10.52
R. Predicha	52.26	4.03	-43.59	

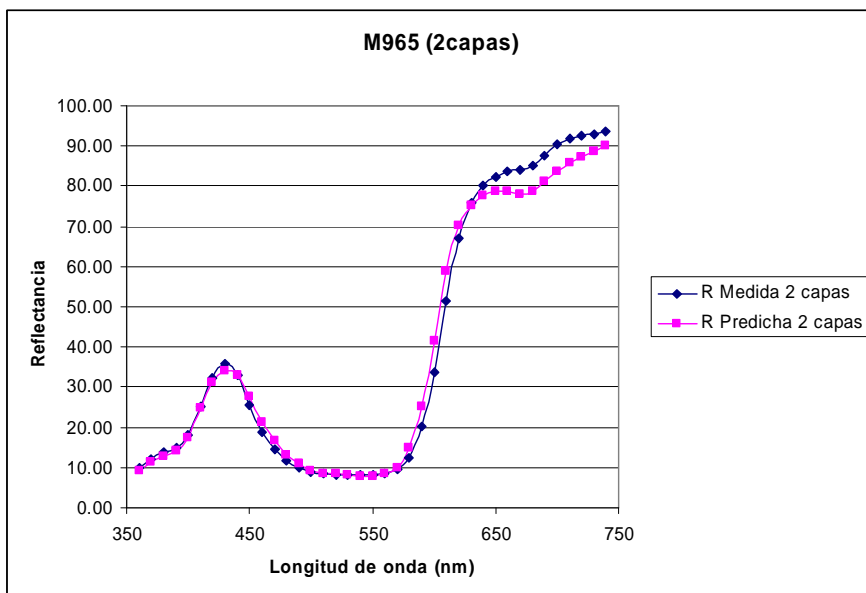
- Igualación del V564 de 3 capas:



V564 (3c)	Concentra.
CyanC1=	1.72
MagentaC2=	0.98
AmarilloC3=	-0.08

V564 (3c)	L*	a*	b*	ΔE*
R. Medida	816.77	-32.6338715	-12.82	8.26
R. Predicha	41.27	37.37	-45.75	

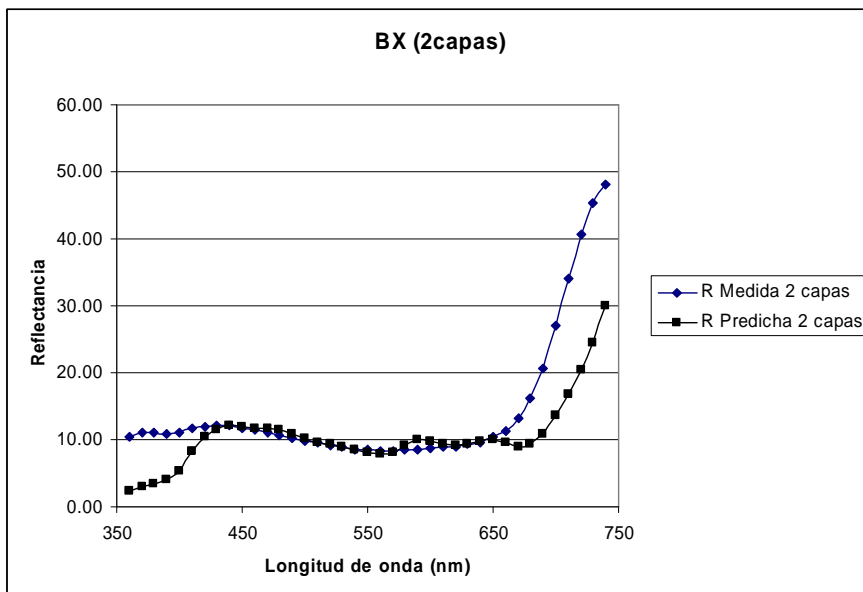
- Igualación del M965 de 2 capas:



M965 (2c)	Concentra.
CyanC1=	0.01
MagentaC2=	1.09
AmarilloC3=	0.12

M965 (2c)	L*	a*	b*	ΔE*
R. Medida	50.12	56.60	-9.85	2.03
R. Predicha	51.64	57.28	-8.69	

- Igualación del BX de 2 capas:



BX (2c)	Concentra.
CyanC1=	3.50
MagentaC2=	0.91
AmarilloC3=	1.17

BX (2c)	L*	a*	b*	ΔE^*
R. Medida	36.13	2.91	-7.32	0.59
R. Predicha	36.38	2.79	-6.80	

Evaluación:

Los resultados obtenidos para estas igualaciones de color, son bastante satisfactorios, ya que si nos fijamos en los valores de ΔE^* obtenidos, de 5, 2 (los correspondientes al M965 y BX) son valores menores que 3, y otro (el G557) tiene un valor de $\Delta E^*=3.01$. Los colores el azul y violeta, tienen ΔE^* s bastante elevados. La predicción no ha sido igual de buena para la zona de los azules y violetas.

Una limitación a la hora de realizar éste tipo de predicción mediante igualación, es que no hemos podido comprobar visualmente los resultados obtenidos (y posteriormente realizar medidas sobre las nuevas muestras creadas), debido a que no podemos mezclar concentraciones de colorantes de números que no sean enteros. Por esa razón hemos calculado las curvas de reflectancia teóricas con las concentraciones de colorante y con las ecuaciones 1.19 y 1.15, para a partir de de ahí poder sacar las coordenadas $L^*a^*b^*$ y calcular la ΔE^* .

Pasamos pues a analizar los resultados obtenidos en el segundo método de predicción que se ha realizado.

- **2º método: Colores que se pueden obtener mediante la mezcla de los primarios sustractivos:**

Debido a que con el primer método de predicción de color, no hemos podido realizar, mezclas de colores para poder medirlas después con el espectrofotómetro, hemos realizado un segundo estudio de predicción, en el que se realizan mezclas entre dos colores, a partir de un número entero de capas de rotulador.

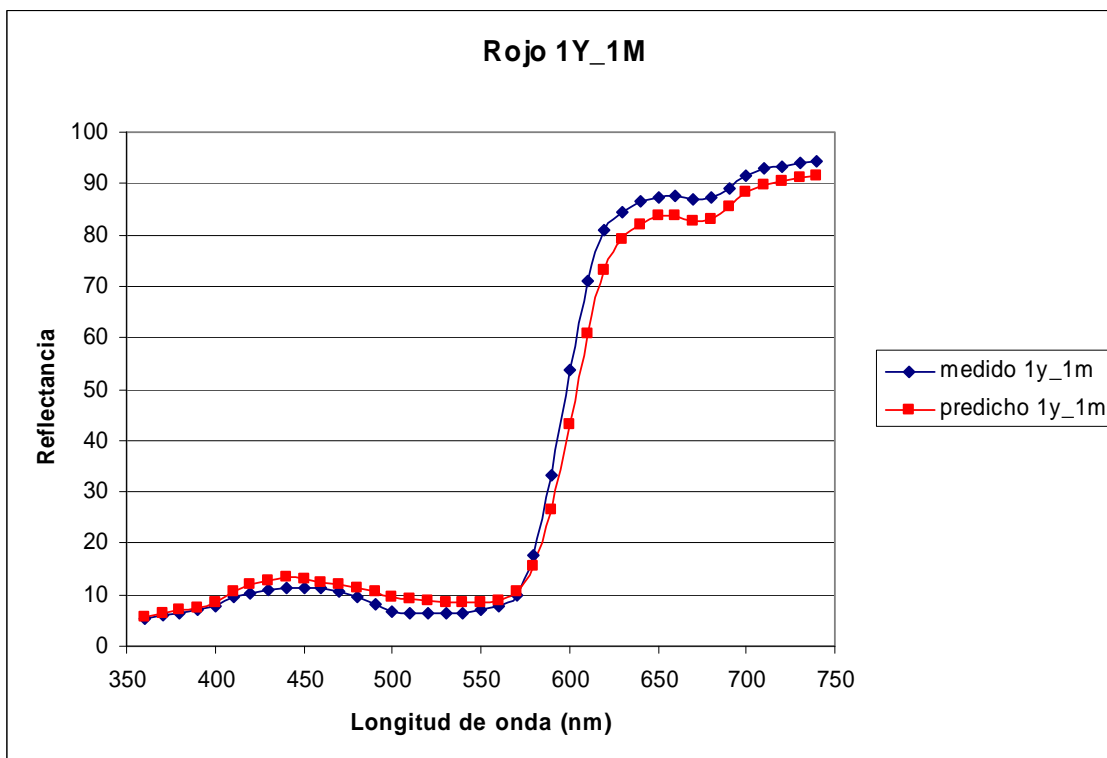
En la tabla que se presenta a continuación, aparecen las distintas combinaciones que se han realizado para sacar las muestras que se han mezclado alternando los primarios sustractivos:

Colores	Cyan	Magenta	Amarillo
Rojo	0	1	1
	0	2	1
	0	3	1
	0	4	1
Anaranjado	0	1	1
	0	1	2
	0	1	3
	0	1	4
Verde oscuro	1	0	1
	2	0	1
	3	0	1
	4	0	1
Verde clarito	1	0	1
	1	0	2
	1	0	3
	1	0	4
Azul Violeta	1	1	0
	2	1	0
	3	1	0
	4	1	0

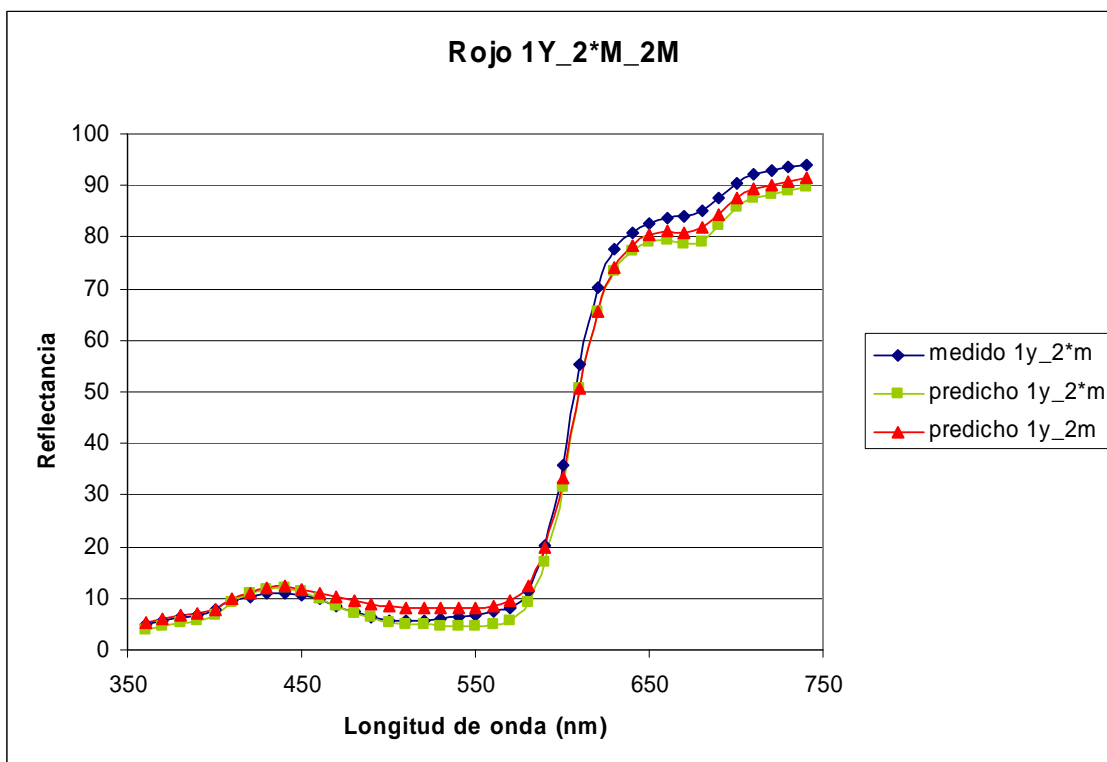
En las siguientes páginas se presentan las 20 gráficas de reflectancia (4 para cada mezcla entre dos colores) correspondientes a las mezclas realizadas y muestras predichas, con sus respectivas tablas con los valores de $L^*a^*b^*$ y la diferencia cromática entre las muestras medidas y las predichas.

Debajo de las tablas de $L^*a^*b^*$, nos encontraremos con una gráfica para ver la evolución de la luminosidad y otra para ver las coordenadas a^*b^* . En esta gráfica el punto marcado con un triángulo, será el punto de coordenadas a^*b^* correspondiente a la mezcla realizada para dos colores con una capa cada uno de ellos; con lo que los puntos consecutivos serán los correspondientes a las mezclas con el aumento de capas del segundo color.

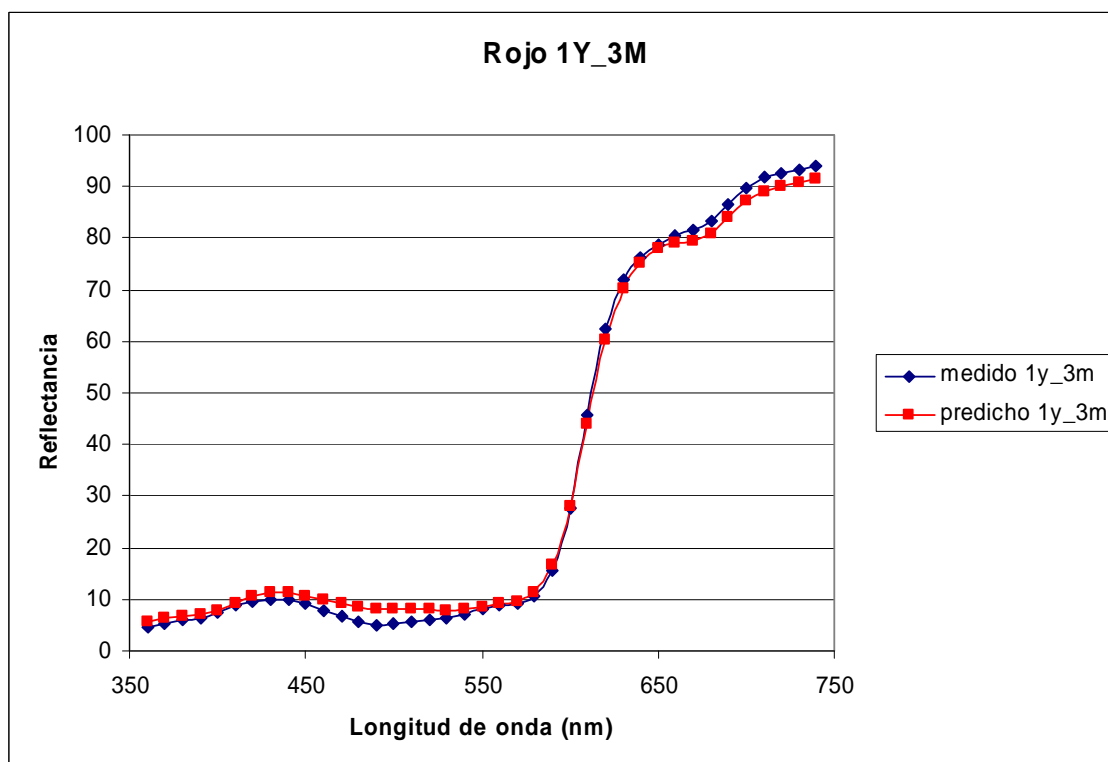
- **Amarillo + capas de magenta → ROJO**



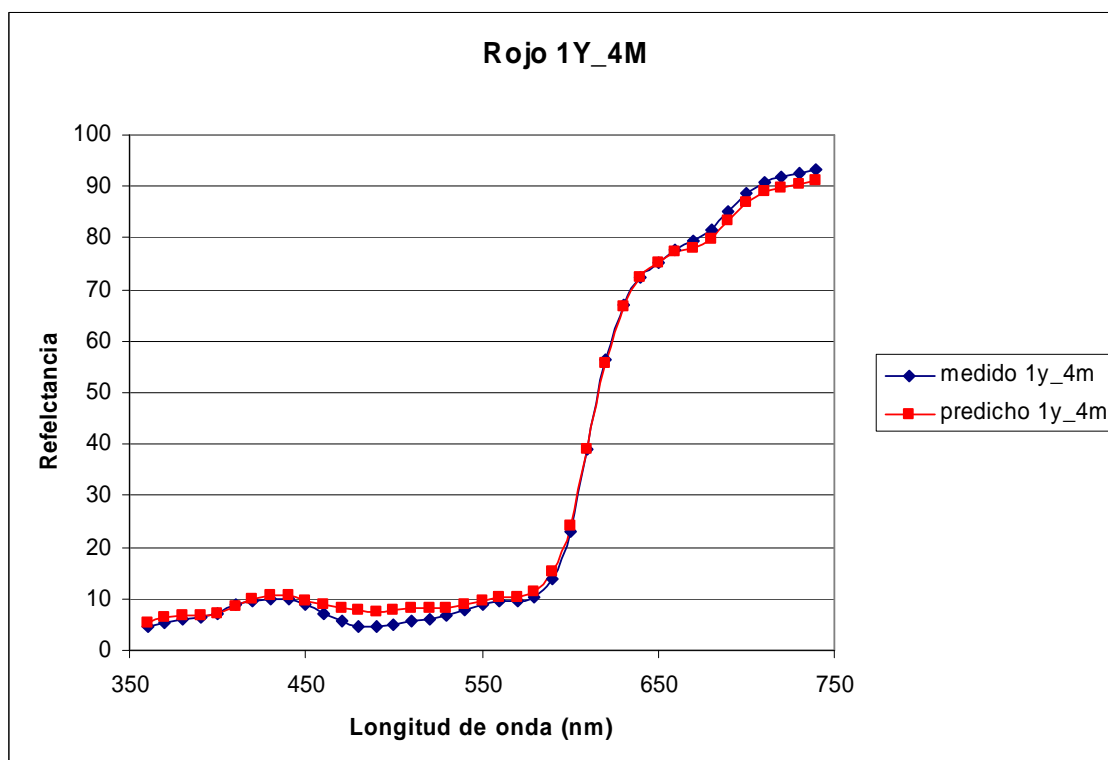
- $\Delta E^* = 9.37$



- $\Delta E^* = 6.69$ (entre la azul y la roja). La curva verde es la predicción realizada con el valor k/s del magenta para una capa multiplicado *2. (debido a que la mezcla tiene dos capas de magenta). Las predicciones salen peor.



- $\Delta E^* = 5.94$

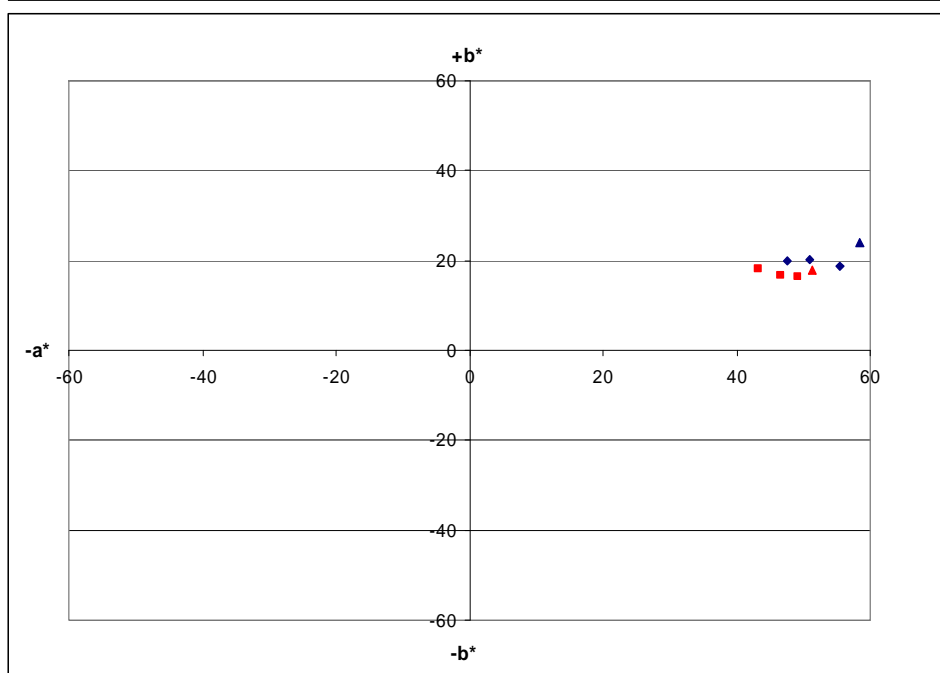
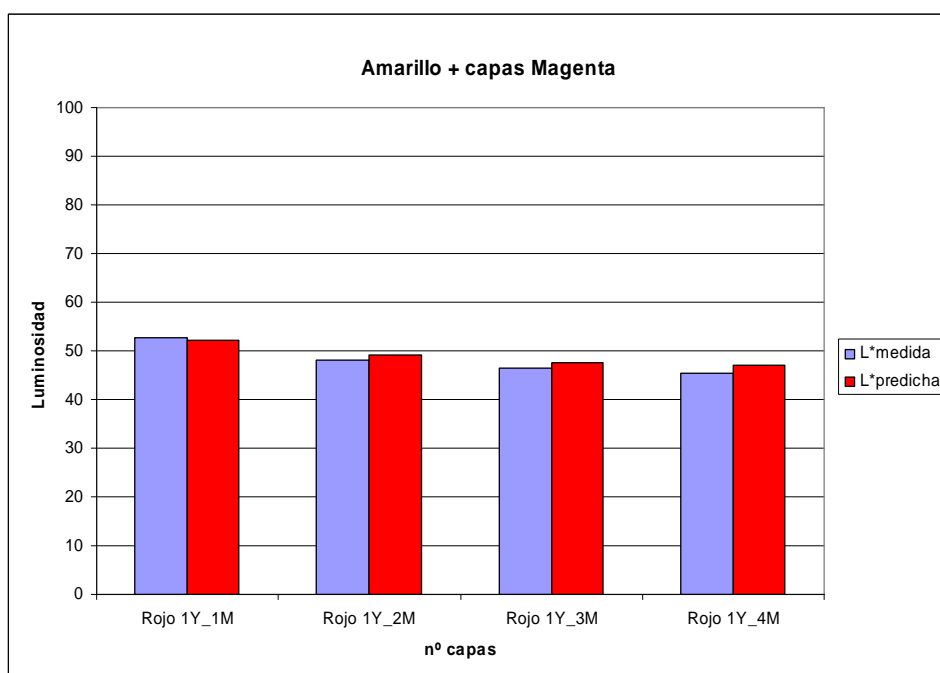


- $\Delta E^* = 4.92$

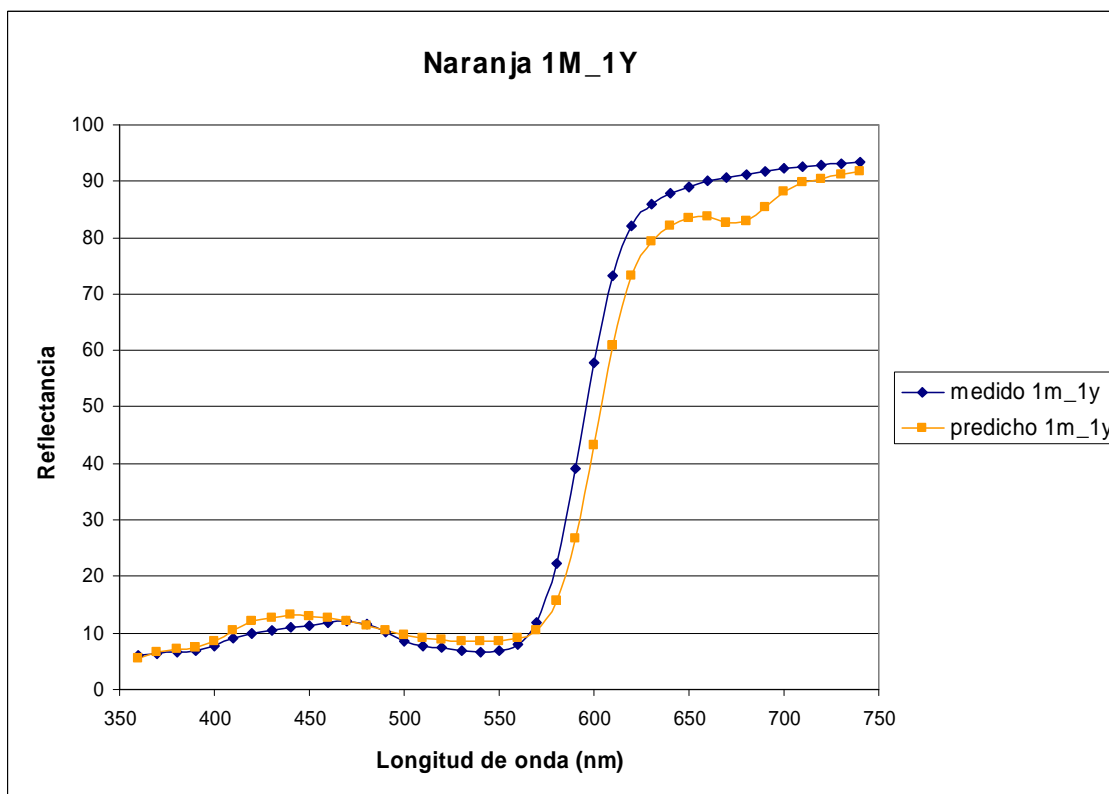
La predicción mejora con el aumento del magenta en la mezcla, es decir, que cuanto más oscura es la muestra, mejor es la predicción de la muestra teórica. Esto lo podemos corroborar en la siguiente hoja, en la cual tenemos los valores de $L^*a^*b^*$ para las muestras medidas y predicha.

medidos	L*medida	a*(D65)	b*(D65)
Rojo 1Y_1M	52.73	58.46	23.86
Rojo 1Y_2M	48.18	55.48	18.67
Rojo 1Y_3M	46.4	51.01	20.24
Rojo 1Y_4M	45.32	47.55	19.85
predicho	L*predicha	a*(D65)	b*(D65)
Rojo 1y, 1m	52.03	51.38	17.75
Rojo 1y, 2m	49.10	49.24	16.44
Rojo 1y, 3m	47.65	46.54	16.54
Rojo 1y, 4m	46.94	43.25	18.09

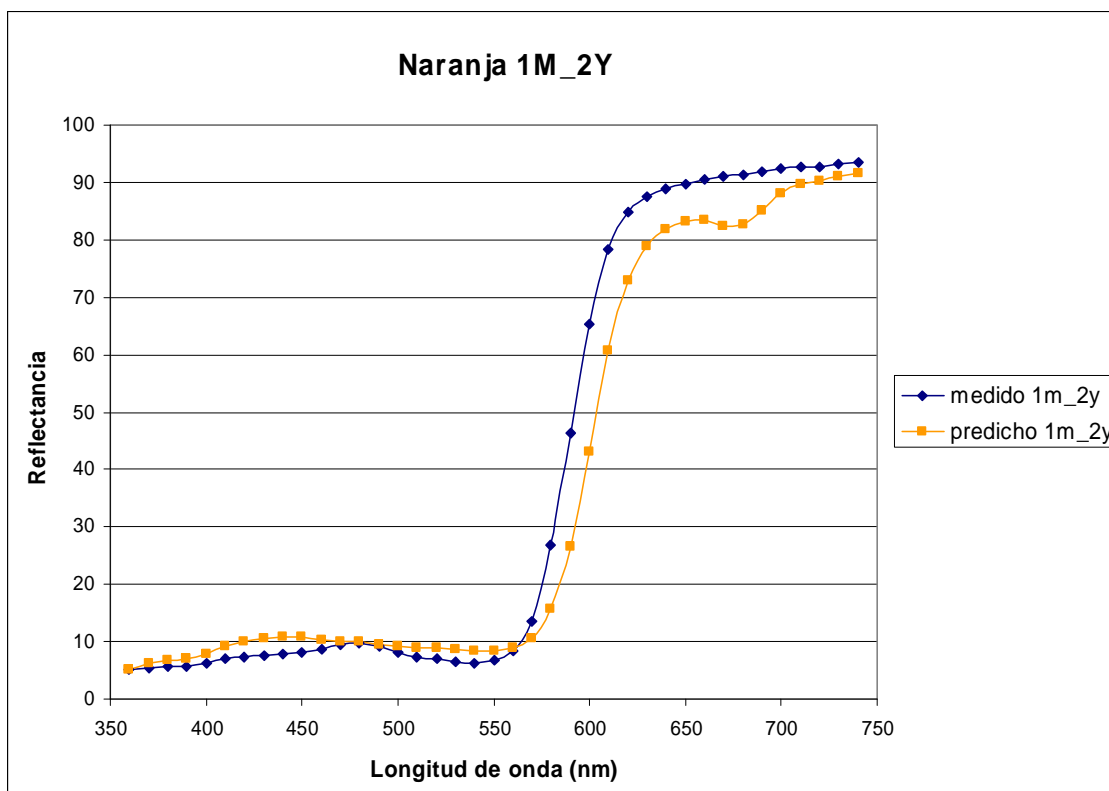
ΔE^*
9.37
6.69
5.94
4.92



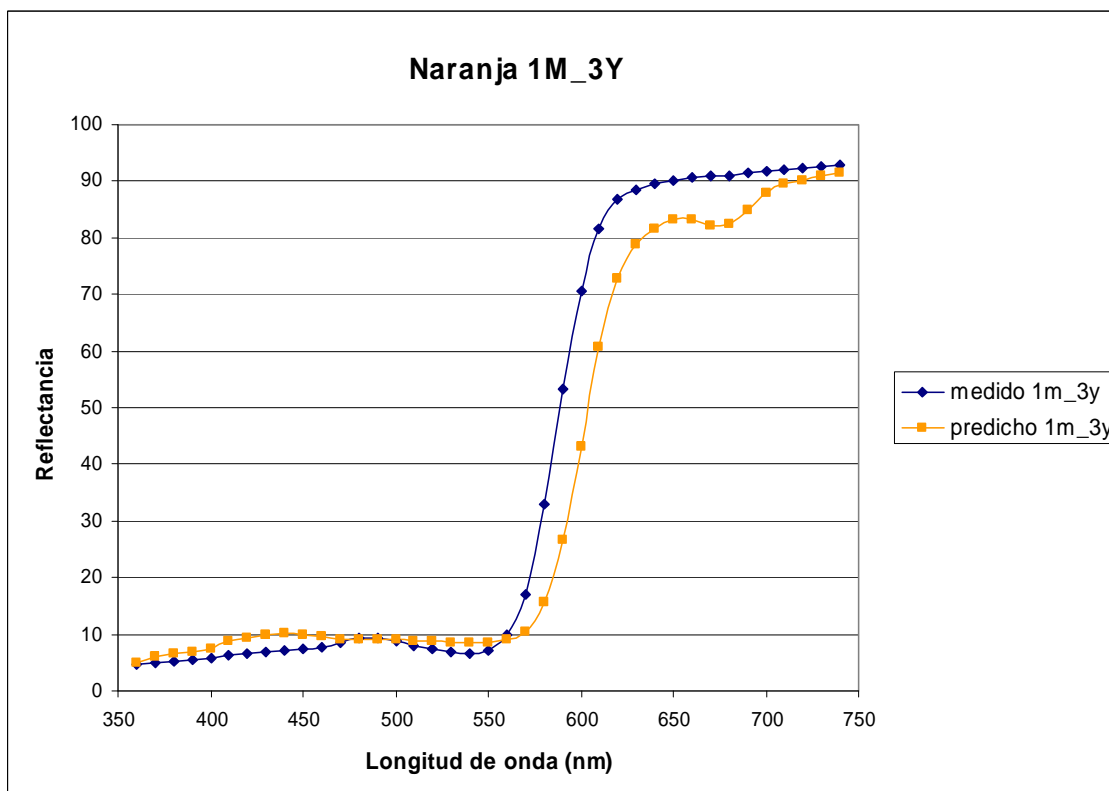
- **Magenta + capas de amarillo → NARANJA**



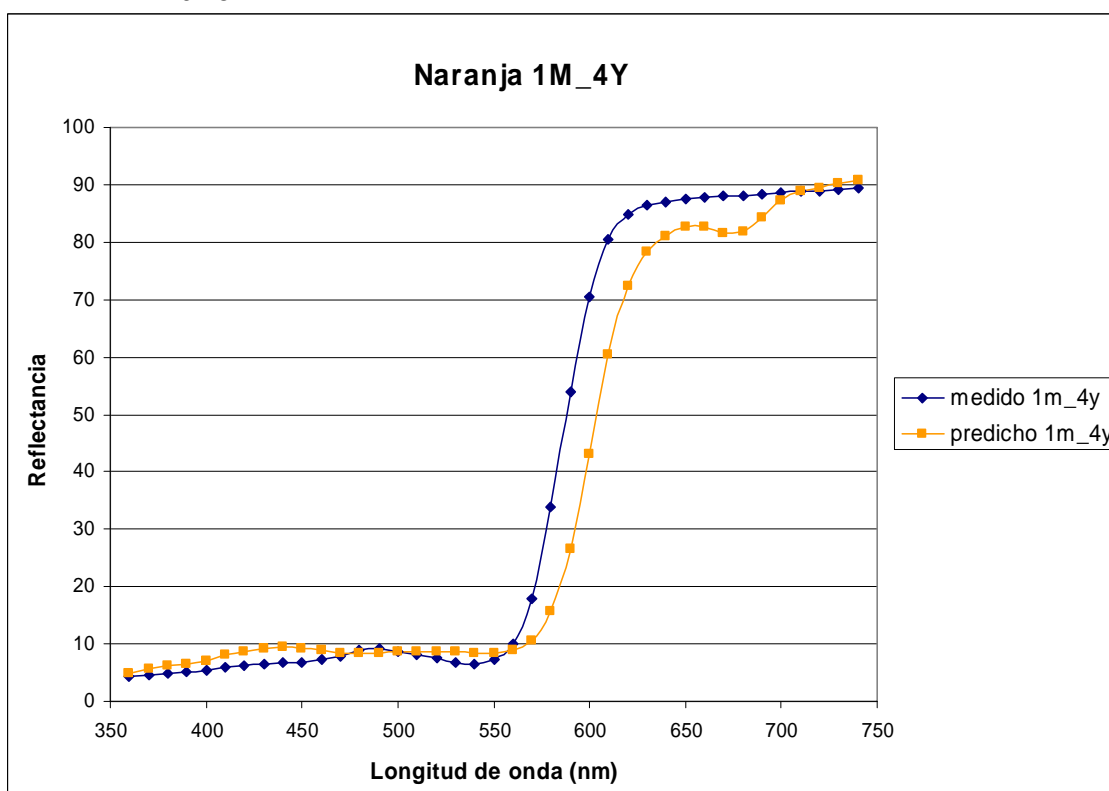
- $\Delta E^* = 10.28$



- $\Delta E^* = 15.90$



- $\Delta E^* = 19.48$

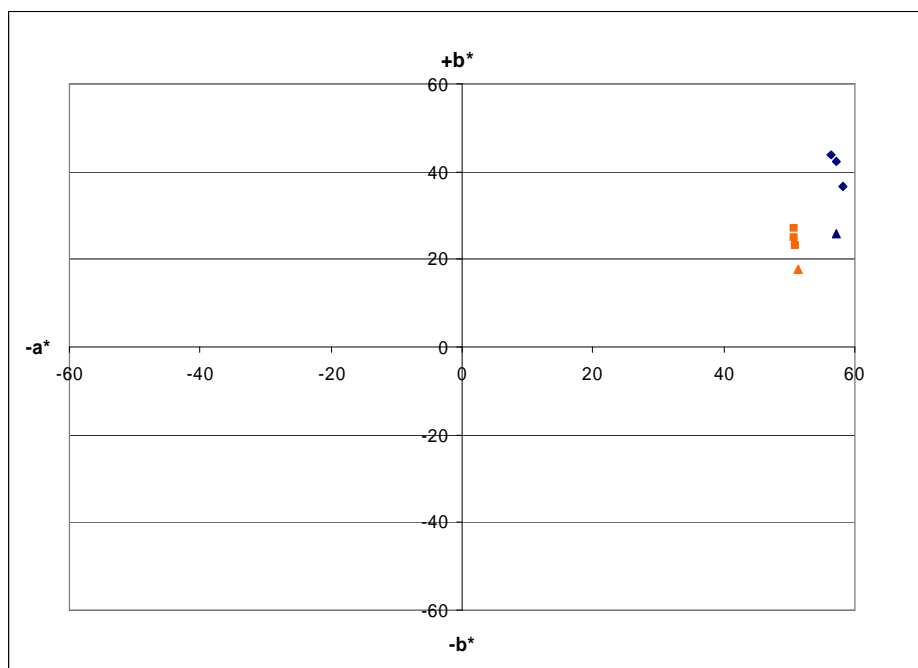
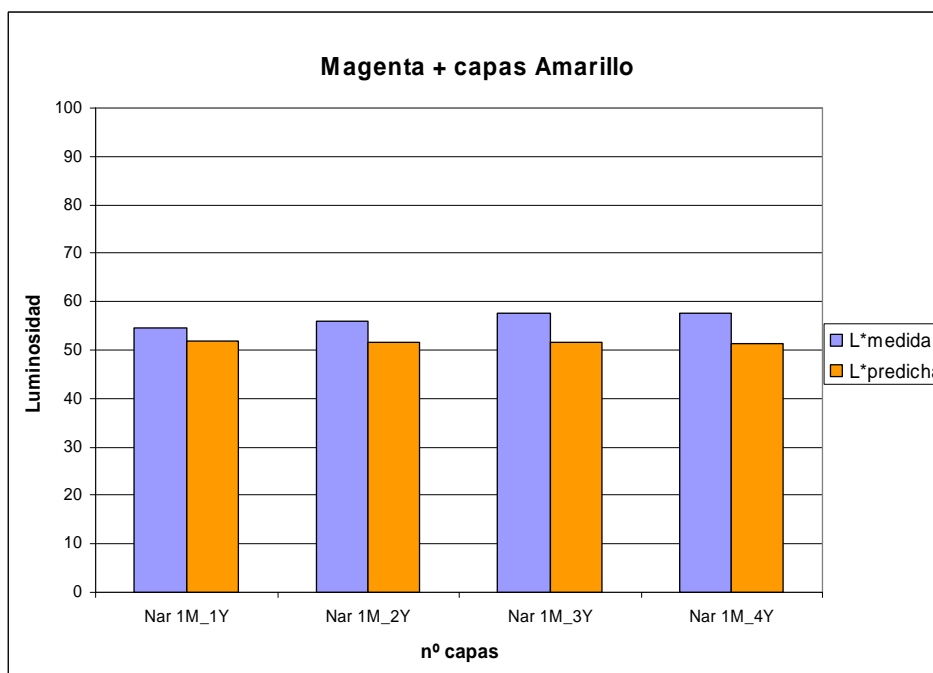


- $\Delta E^* = 18.96$

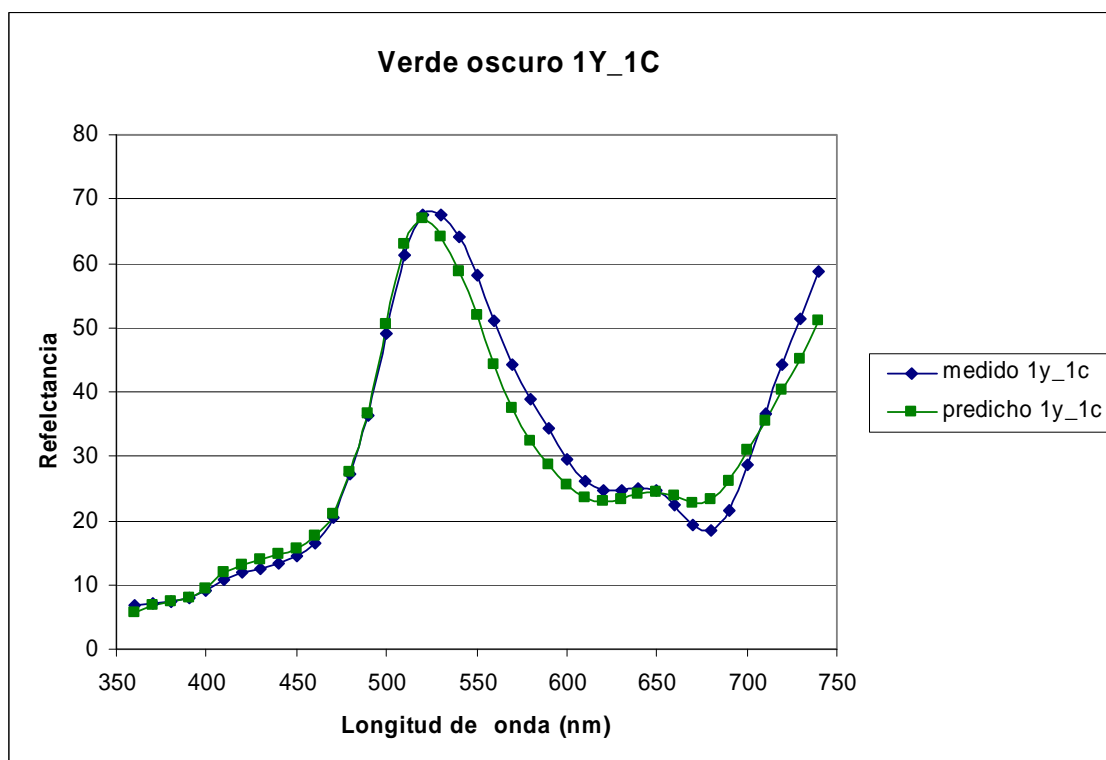
La predicción empeora con el aumento del amarillo, esto es debido a que el amarillo es un color que se satura pronto (para su 3ª capa superpuesta), con lo que al hacer las predicciones que contengan mas capas de amarillo, se aproximarán peor a la muestra.

Medidos	L*medida	a*(D65)	b*(D65)
Nar 1M_1Y	54.55	57.23	25.83
Nar 1M_2Y	55.85	58.15	36.5
Nar 1M_3Y	57.71	57.28	42.32
Nar 1M_4Y	57.66	56.42	43.87
Predichos	L*predicha	a*(D65)	b*(D65)
Nar 1M_1Y	52.04	51.38	17.76
Nar 1M_2Y	51.76	50.87	22.97
Nar 1M_3Y	51.62	50.77	25.00
Nar 1M_4Y	51.43	50.66	26.92

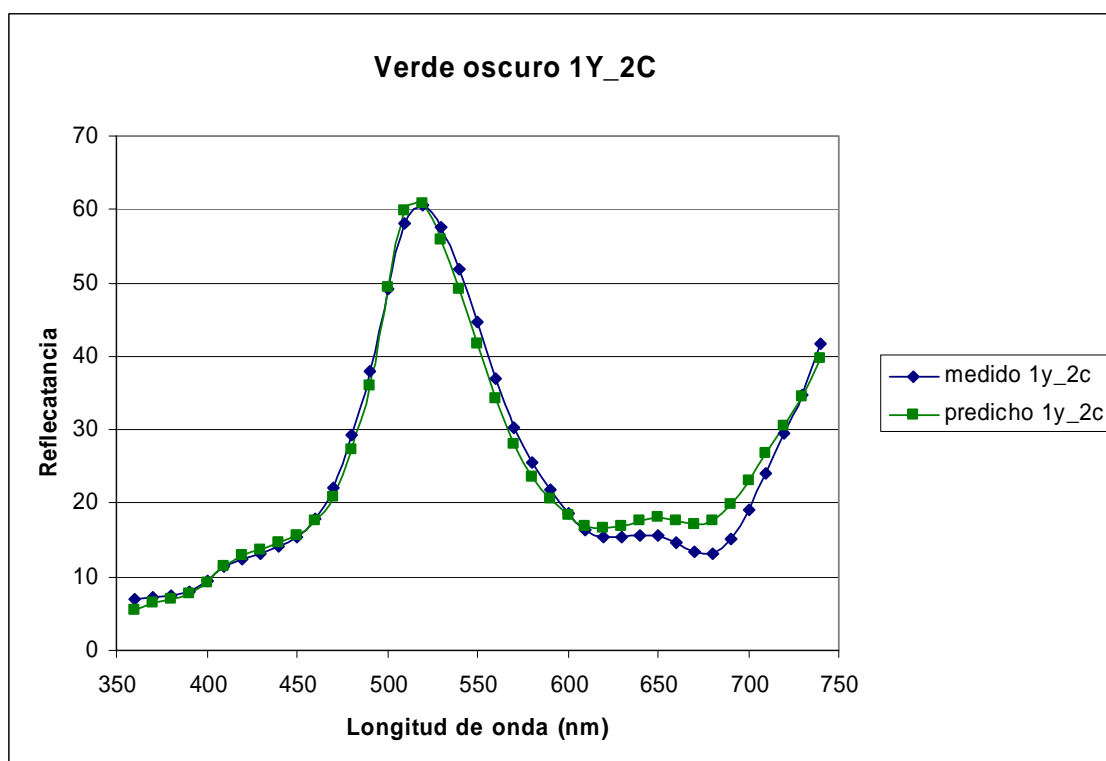
ΔE^*
10.28
15.90
19.48
18.96



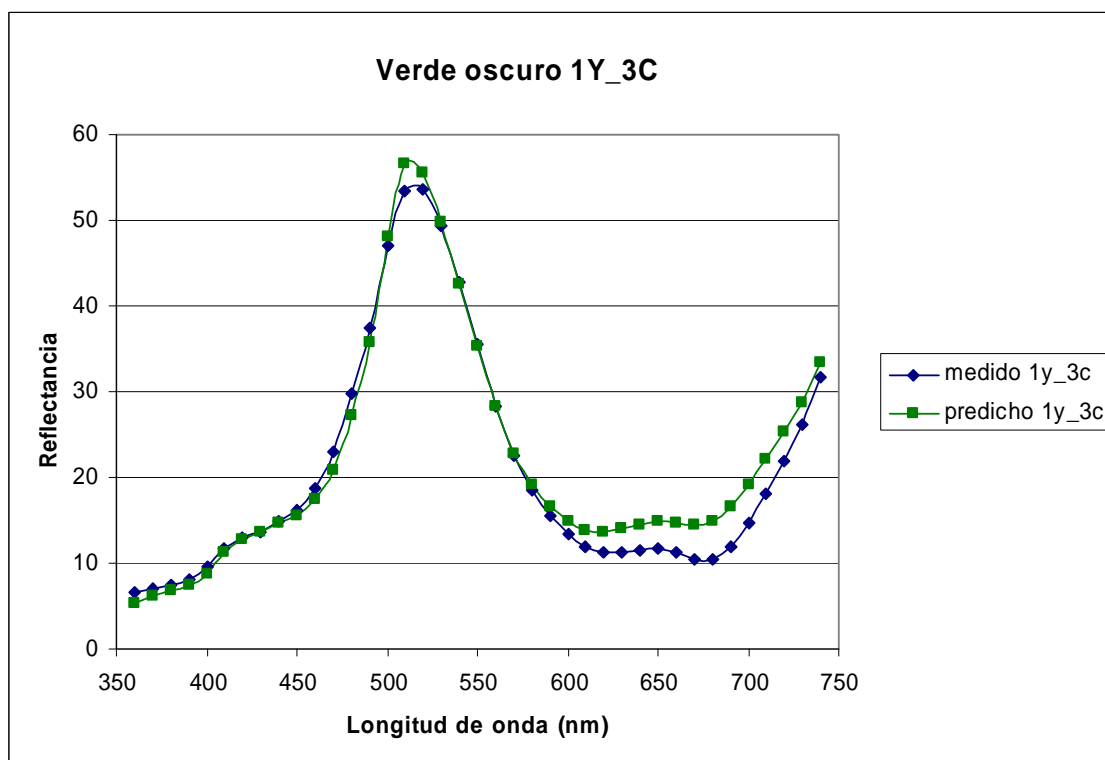
- **Amarillo + capas de cyan → VERDE OSCURO**



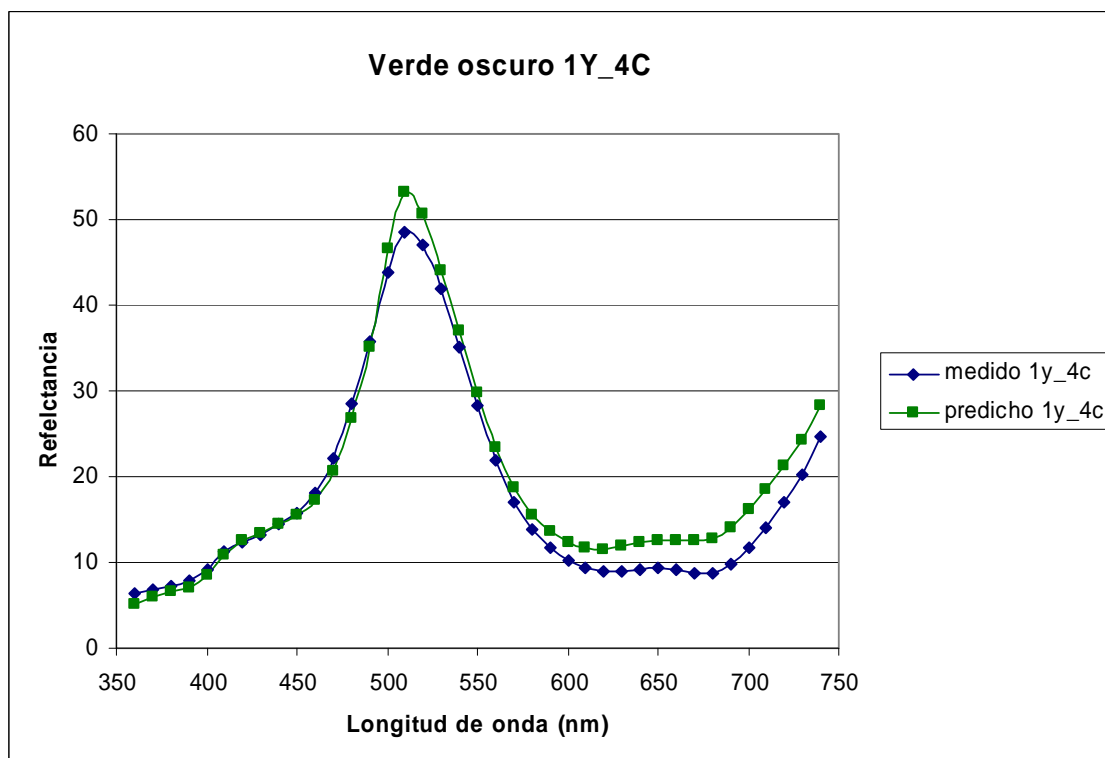
- $\Delta E^* = 6.55$



- $\Delta E^* = 1.93$



- $\Delta E^* = 3.34$

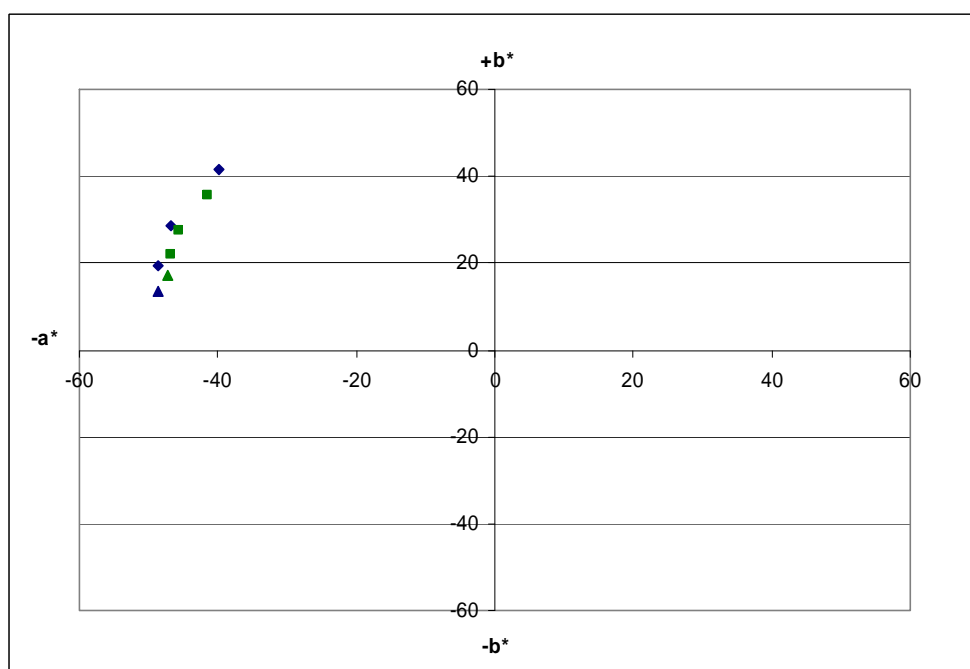
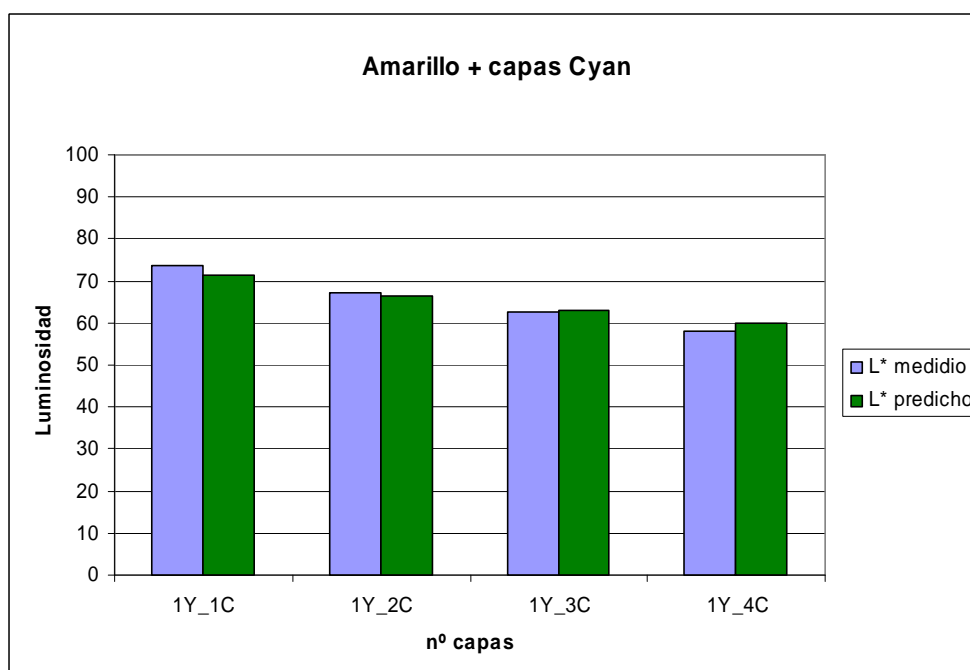


- $\Delta E^* = 4.39$

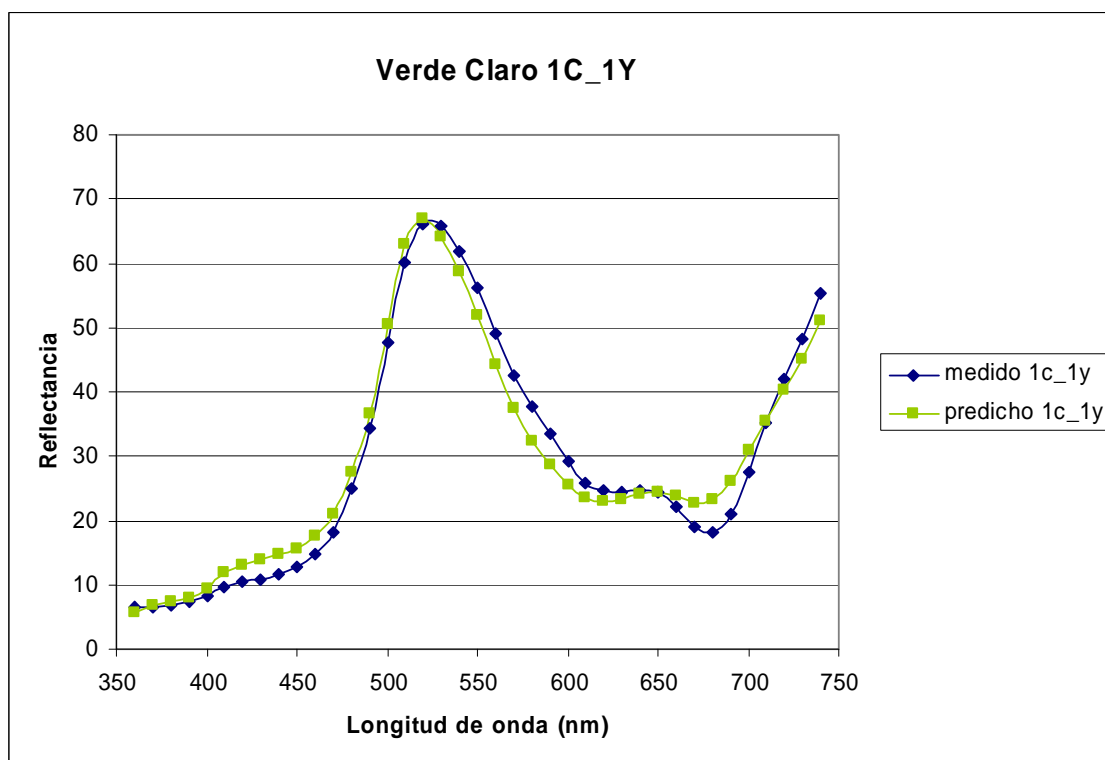
La predicción es bastante buena, debido a que los valores de ΔE^* están bastante cercanos al 3, con lo que podríamos decir que la predicción no mejora con el aumento de capas de cian, pero tampoco empeora.

medido	L* medida	a*(D65)	b*(D65)
1Y_1C	73.73	-39.87	41.58
1Y_2C	67.36	-46.88	28.51
1Y_3C	62.51	-48.67	19.28
1Y_4C	58.17	-48.76	13.46
predicho	L* predicha	a*(D65)	b*(D65)
1Y_1C	71.51	-41.47	35.63
1Y_2C	66.50	-45.54	27.43
1Y_3C	63.09	-46.81	21.99
1Y_4C	59.95	-47.15	17.14

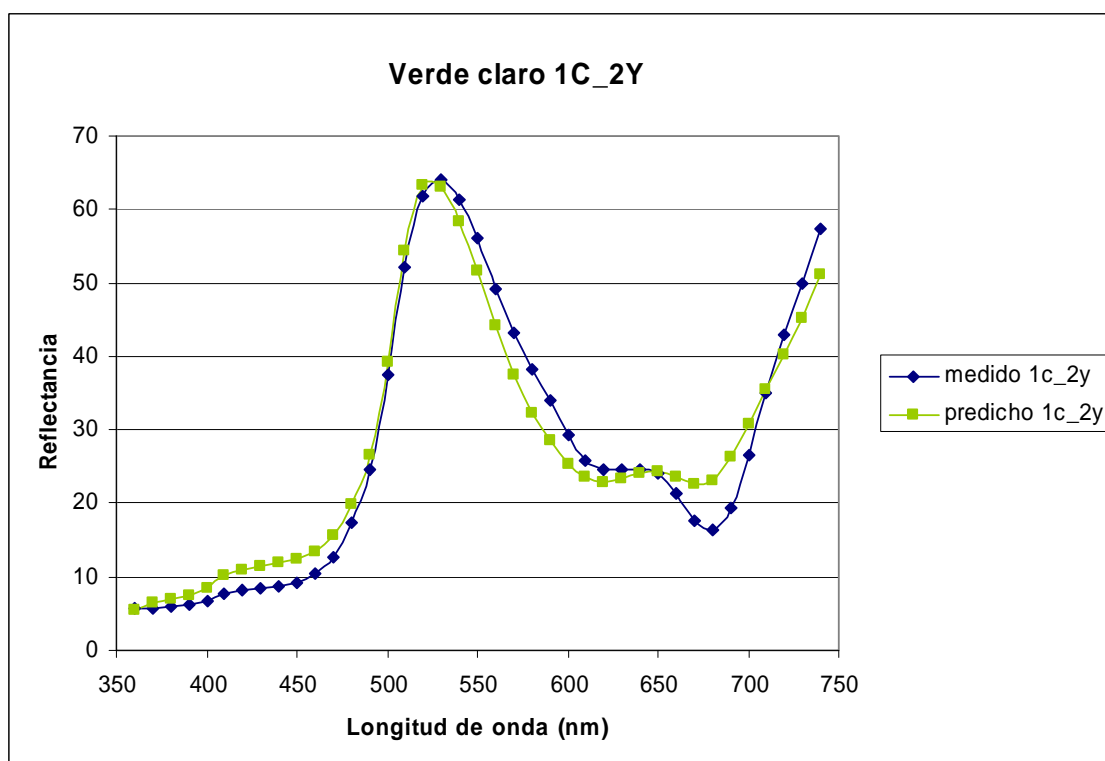
ΔE^*
6.55
1.93
3.34
4.39



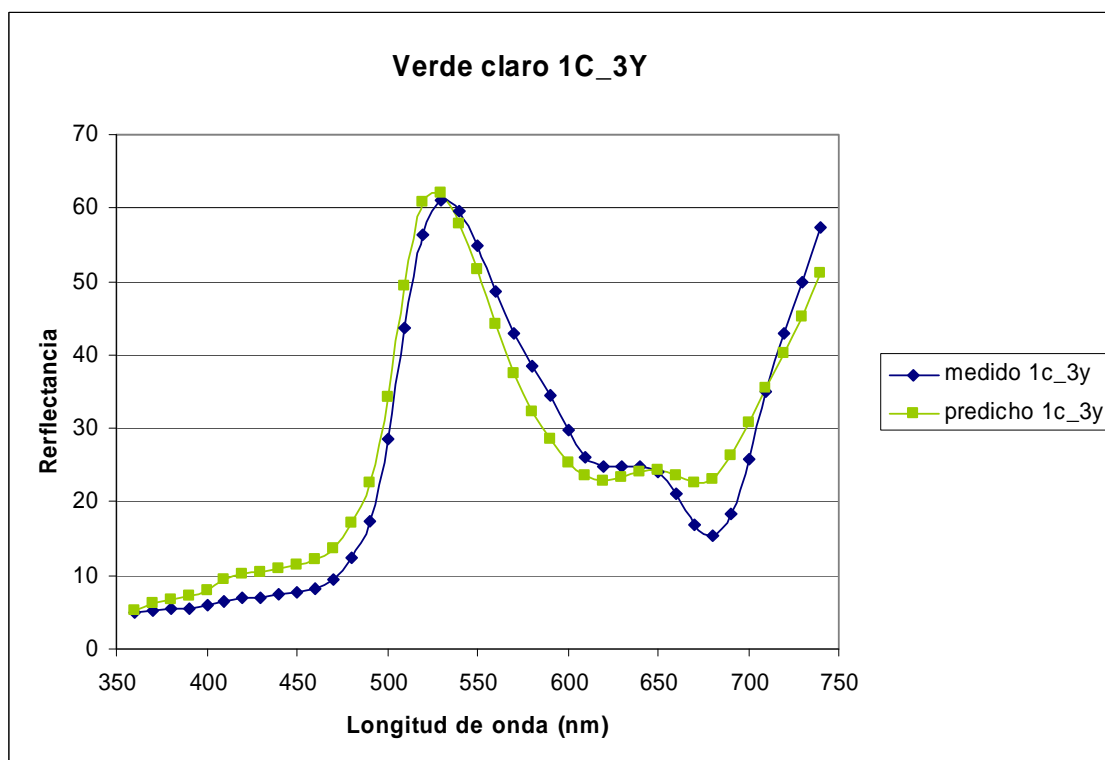
- Cyan + capas de amarillo → VERDE CLARITO**



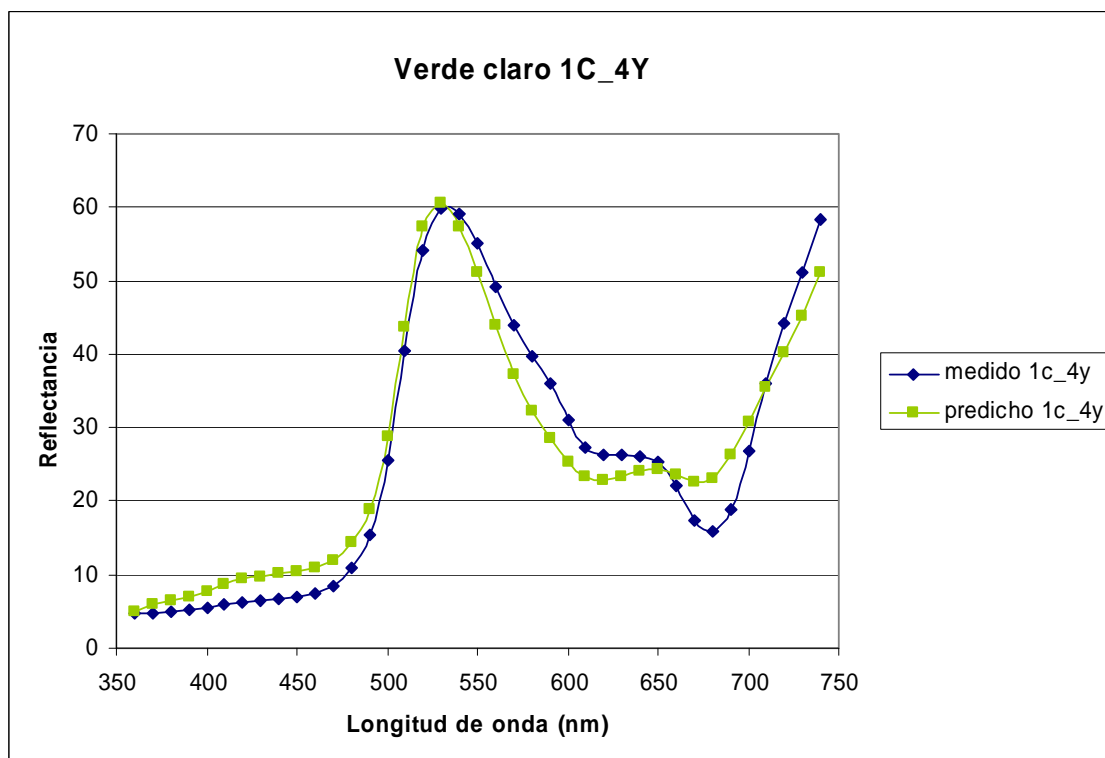
- $\Delta E^* = 8.46$



- $\Delta E^* = 10.08$



- $\Delta E^* = 12.97$

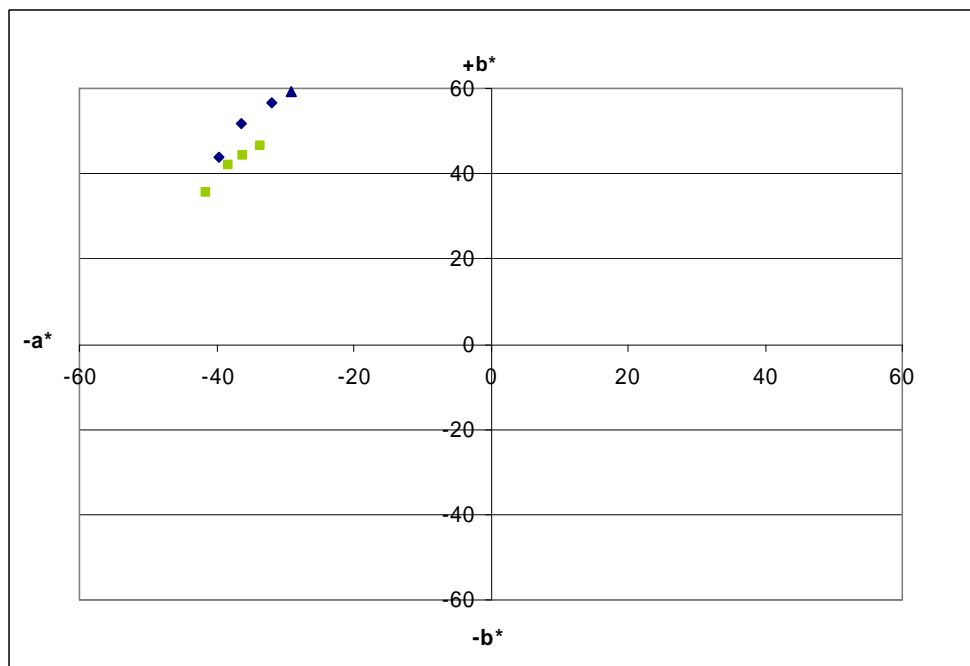
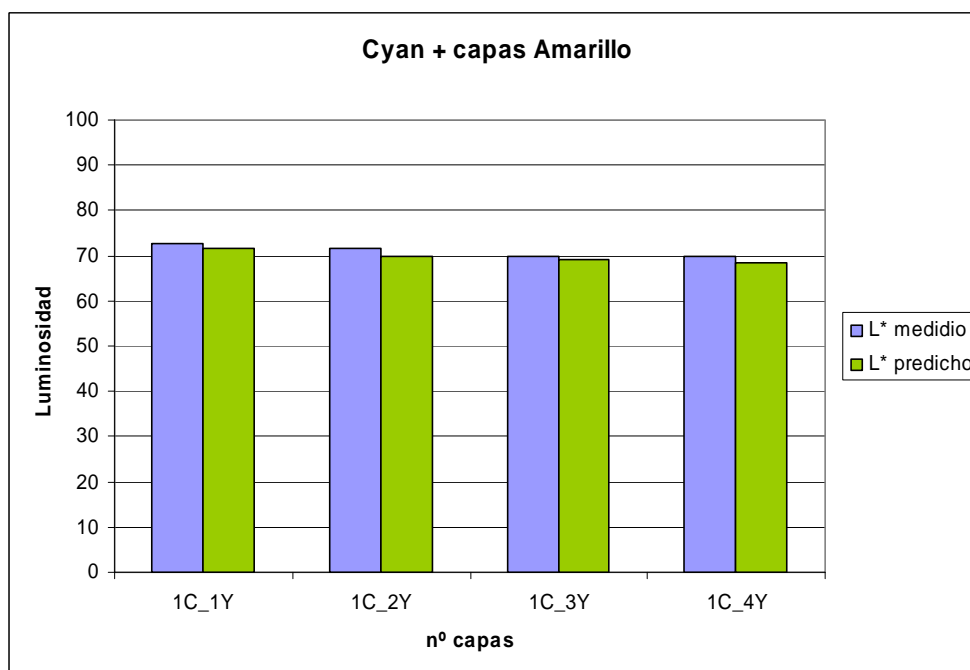


- $\Delta E^* = 13.68$

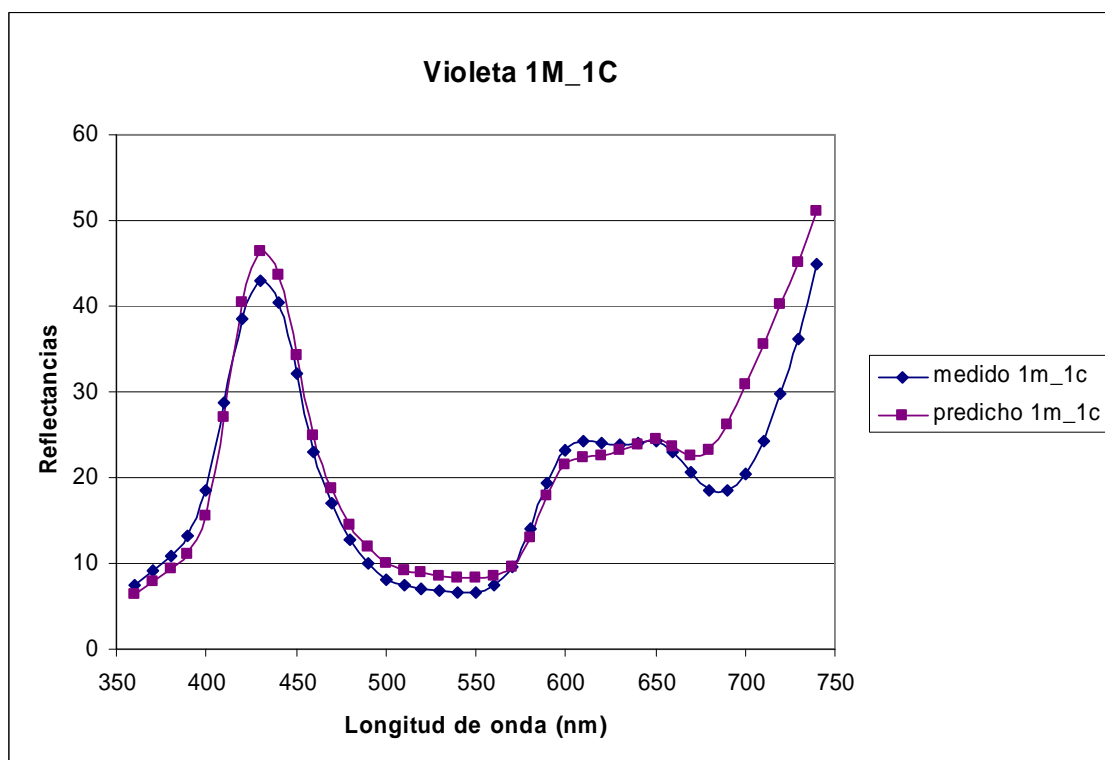
Con el aumento del amarillo la predicción empeora, igual que en el caso del naranja, que a medida que añadíamos amarillo, la predicción empeoraba. La caída que esta, justo después del punto de máxima reflectancia, va siendo cada vez mas abrupta con el aumento de las capas amarillas, aproximándose peor a la mezcla medida.

medido	L* medida	a*(D65)	b*(D65)
1C_1Y	72.79	-39.63	43.78
1C_2Y	71.5	-36.47	51.85
1C_3Y	69.98	-31.95	56.58
1C_4Y	69.84	-29.12	59.13
predicho	L* predicha	a*(D65)	b*(D65)
1C_1Y	71.51	-41.47	35.63
1C_2Y	70.03	-38.20	42.03
1C_3Y	69.26	-36.18	44.34
1C_4Y	68.33	-33.59	46.29

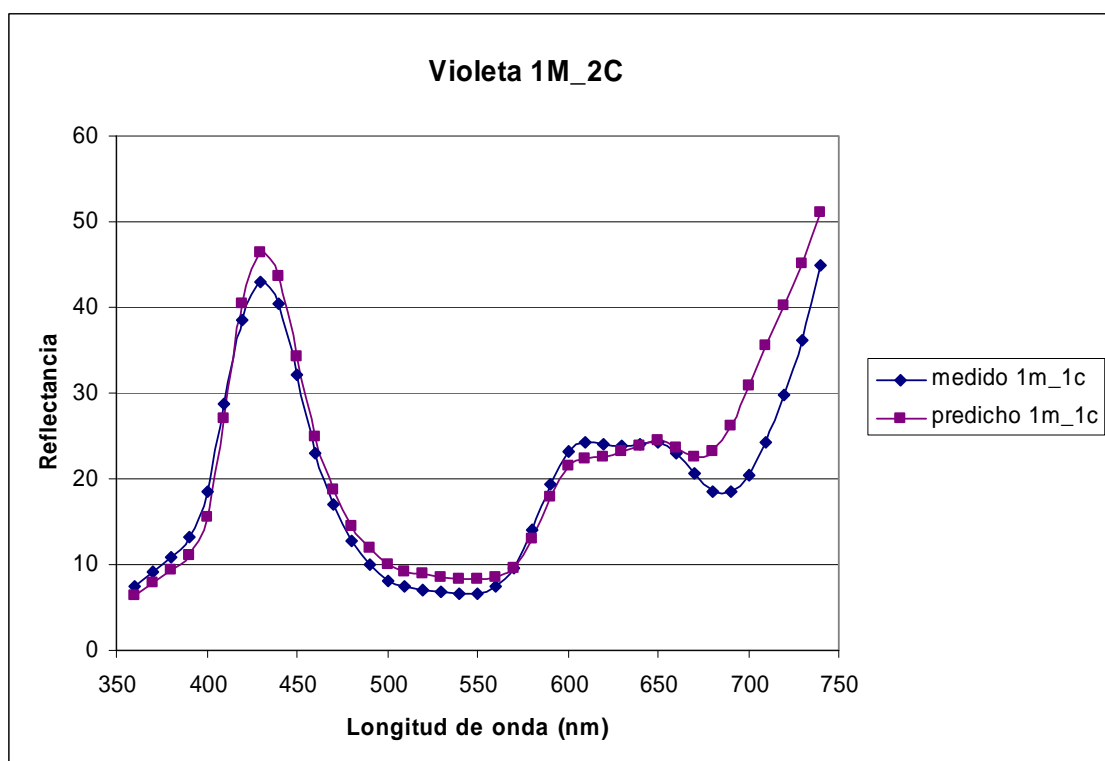
ΔE^*
8.46
10.08
12.97
13.68



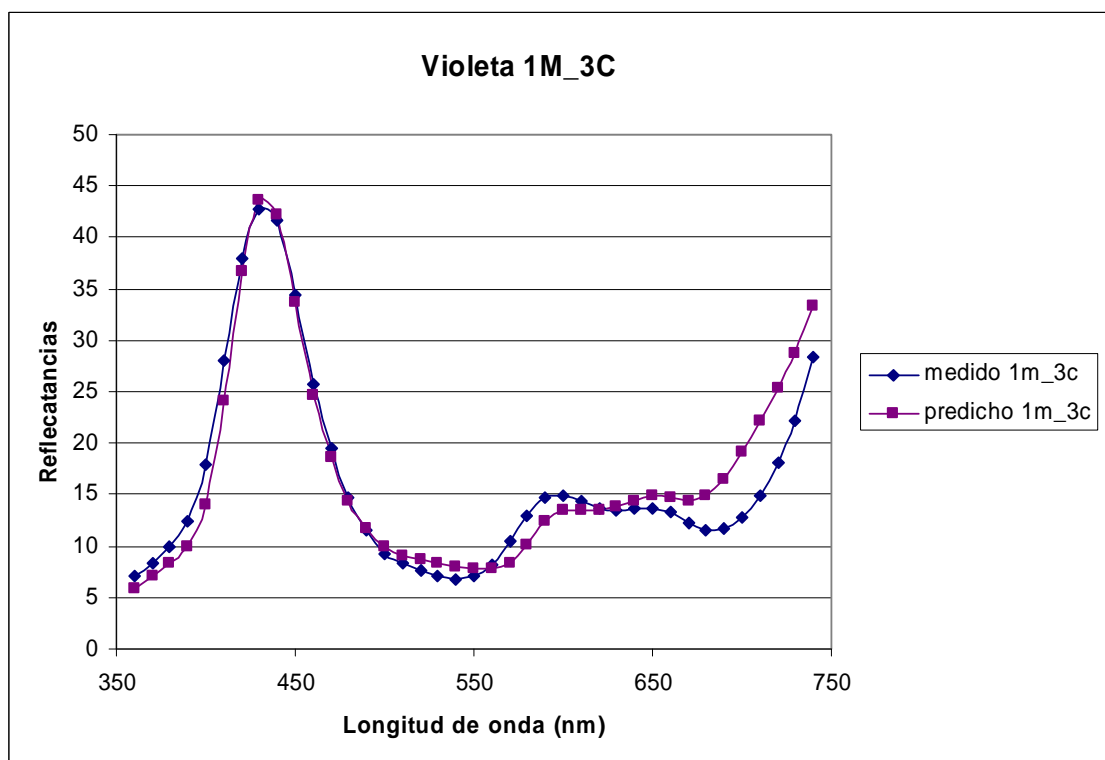
- **Magenta + capas de cyan → VIOLETA**



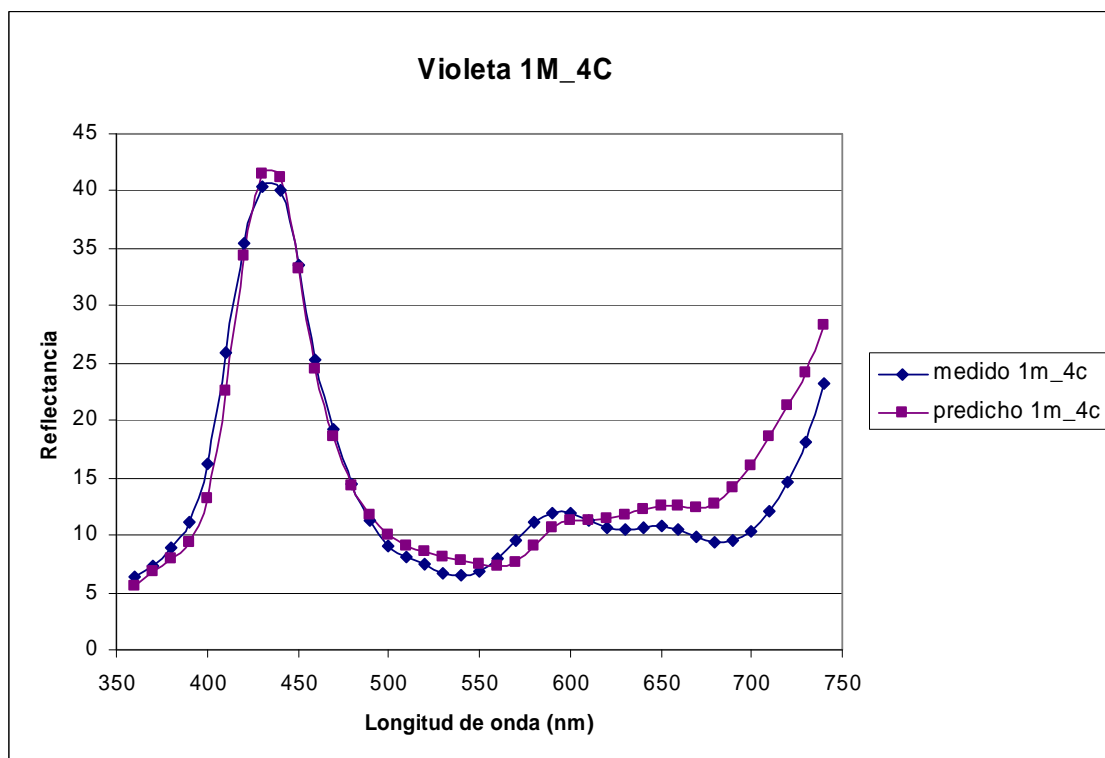
- $\Delta E^* = 4.45$



- $\Delta E^* = 3.08$



- $\Delta E^* = 2.44$



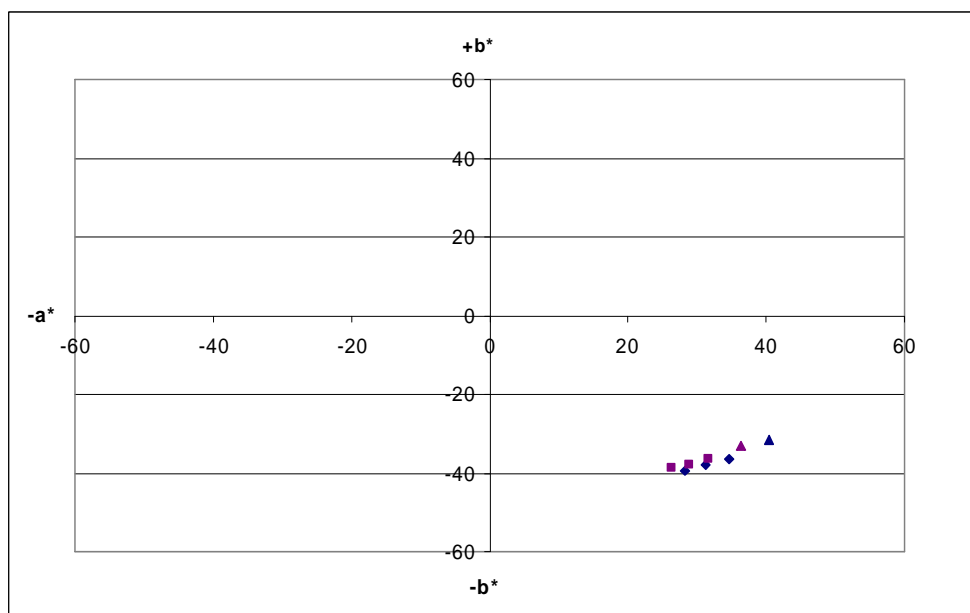
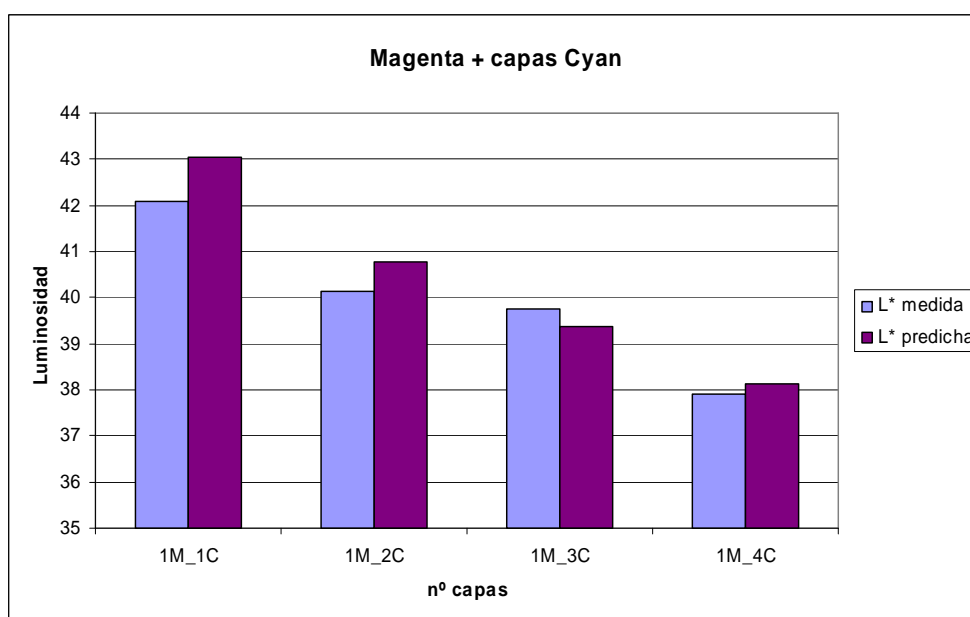
- $\Delta E^* = 1.96$

A medida que aumentamos el número de capas de cyan, el pico del cyan de las muestras predichas, se aproxima mejor a la muestra medida, la reflectancia es menor debido a que la muestra, es cada vez más oscura

En este caso, al aumentar el nº de capas de cian, como este es más clarito que el magenta, la predicción mejora y los valores de ΔE^* se reducen, como se puede observar en las siguientes tablas y gráficas.

medido	L* medida	a*(D65)	b*(D65)
1M_1C	42.09	40.4	-31.45
1M_2C	40.13	34.61	-36.53
1M_3C	39.76	31.21	-37.79
1M_4C	37.92	28.24	-39.33
predicho	L* predicha	a*(D65)	b*(D65)
1M_1C	43.06	36.36	-33.06
1M_2C	40.78	31.61	-36.28
1M_3C	39.37	28.80	-37.83
1M_4C	38.13	26.37	-38.81

ΔE^*
4.45
3.08
2.44
1.96



Evaluación

- Si realizamos la predicción con los valores k/s del grosor de cada capa (es decir, para valores k/s de capas superpuestas), los resultados salen mejor que si realizamos las predicciones con valores de k/s para una capa y multiplicados por el número de capas superpuestas en la mezcla. Esto es debido a que la función K-M es lineal hasta la cuarta en el caso del cyan y magenta (corroborado con ΔE^*), pero no para el amarillo, que se satura para la tercera capa.
- En la mezcla de rojo en la segunda capa (una capa de amarillo y dos de magenta), la L^* de la muestra predicha es mayor, aunque su curva de reflectancia está en casi todo el espectro por debajo de la medida.
- Se observa que a medida que vamos añadiendo capas del segundo color, la predicción empeora cuando este es el amarillo, debido a que al ser un color claro y al saturarse para casi la segunda capa, la predicción es peor. Esto ocurre en el caso de la mezcla naranja y verde clara.
- Con el aumento de las capas de magenta y de cyan, las predicciones mejoran, debido a que en la función K-M, estas siguen una mejor linealidad que en el caso del amarillo.

CONCLUSIONES FINALES

5. CONCLUSIONES FINALES

- Se ha estudiado la reproducción del color de 12 rotuladores TRIA de uso profesional, que intentan reproducir los colores PANTONE.
- Las muestras creadas para la realización de este proyecto, las cuales se han pintado sobre un papel profesional, se fueron pintando capa a capa, hasta tener un total de seis capas de rotulador superpuestas. Obteniendo así, seis muestras con un número de capas diferente cada una (de 1 a 6).
- De las gráficas de reflectancia espectral de cada color, se han elegido ciertas longitudes de onda (características para cada color) basándonos en los máximos y mínimos de la misma.
- A medida que se aumenta el número de capas de color (mayor concentración de colorante), la reflectancia disminuye, debido a que la absorción de la luz es mayor y la reflexión menor. También los picos máximos se desplazan hacia longitudes de onda mayores.
- El color queda saturado para 4 capas superpuestas de rotulador. Esto se puede observar o bien analizando la ΔE^* (diferencia cromática) entre muestras adyacentes, o bien en la representación de los valores K/S de las longitudes de onda características de cada color.
- Analizando los resultados de 64 observadores de visión normal, queda reflejado que en la mayoría de los casos, estos emparejan la muestra de rotulador con el patrón PANTONE de menor ΔE^* . Si por el contrario los valores de ΔE^* son en general bastante elevados (como en el caso del R765 y V564), los observadores se decantan con el que tiene menor ΔL^* , es decir con la muestra más parecida en cuanto a luminosidad.
- El Color Cue 2, no es una herramienta demasiado acertada para la aproximación del color de los rotuladores TRIA a los patrones de PANTONE, debido a que de los 12 colores, los observadores coinciden solo en 4 ocasiones con el resultado que muestra el colorímetro.
- En cuanto a los dos métodos realizados de predicción de color, el de igualación de color mediante las concentraciones de colorante, aproxima mejor la reflectancia teórica a la de la original, obteniendo valores de ΔE^* bastante bajos. Su inconveniente, es que no podemos pintar las muestras predichas, debido a que los resultados no son valores enteros de capas de rotulador.
- En el segundo método de predicción, se han realizado unas mezclas mediante los rotuladores cian, magenta y amarillo, y utilizando un número entero de capas. Los resultados en general, no son tan buenos como los del primer método. Las predicciones la curva de reflectancia empeoran cuando el color que superponemos más veces el color amarillo.

BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFIA

Libros

- Medida e igualación del Color en Textiles. H. S. Shah, R. S. Ghandhi
- Óptica Fisiológica. Psicofísica de la Visión. J.M. Artigas, P. Capilla, A. Felipe, J. Pujol
- Marker Magic- The rendering Problem solver for Designers. Richrd M. McGarry and Greg Madsen
- CIE, Commission Internationale de L'eclairage. Technical report (Colorimetry)

Artículos

[1] The emotional Connotations of Color: A Qualitative Investigation. Tom Clarke, Alan Costall

[2] The Kubelka Munk theory, applications and modifications. Frédéric P.-A. Cortat. December 19, 2003.

[3]Revisión I de la teoría de Kubelka Munk. Teoría y Aplicación. Li Yang y Björn Kruse. Vol. 21, No. 10/Ocober 2004/J. Opt. Am. A.

[4]Revisión II de la teoría de Kubelka Munk. Marco unificado para medios ópticos homogéneos y heterogéneos. Li Yang y Björn Kruse and Stanley J.Miklavcic. J. Opt. Soc Am. A/Vol. 21, No. 10/October 2004.

[5]Revisión III de la teoría de Kubelka Munk. Teoría general de la propagación de la luz en un medio de dispersión y absorción. Li Yang y J.Miklavcic. J. Opt. Soc. Am. A/Vol. 22, No. 9/September 2005.

[6]A Generis Aproach To Color Modeling. Roy S. Berns. Munsell Color Science Laboratory, Chester F Clarson Center for Imaging Science, Rochester Institute of Technology, 54 Lomb Memorial Drive, Roachester, New York 14623-5604. Received 21 November 1996; accepted 23 January 1997

- **Paginas web**

www.gusgsm.com

www.letraset.com

www.pantone-espana.com

ANEXOS

7. ANEXOS

- **Valores del Observador estándar**

Longitud de onda (nm)	Iluminante D65	x(λ)	y(λ)	z(λ)
360nm	46.63830	0.00000	0.00000	0.00000
370nm	52.08910	0.00000	0.00000	0.00000
380nm	49.97550	0.00020	0.00000	0.00070
390nm	54.64820	0.00240	0.00030	0.01050
400nm	82.75490	0.01910	0.00200	0.08600
410nm	91.48600	0.08470	0.00880	0.38940
420nm	93.43180	0.20450	0.02140	0.97250
430nm	86.68230	0.31470	0.03870	1.55350
440nm	104.86500	0.38370	0.06210	1.96730
450nm	117.00800	0.37070	0.08950	1.99480
460nm	117.81200	0.30230	0.12820	1.74540
470nm	114.86100	0.19560	0.18520	1.31760
480nm	115.92300	0.08050	0.25360	0.77210
490nm	108.81100	0.01620	0.33910	0.41530
500nm	109.35400	0.00380	0.46080	0.21850
510nm	107.80200	0.03750	0.60670	0.11200
520nm	104.79000	0.11770	0.76180	0.06070
530nm	107.68900	0.23650	0.87520	0.03050
540nm	104.45000	0.37680	0.96200	0.01370
550nm	104.04600	0.52980	0.99180	0.00400
560nm	100.00000	0.70520	0.99730	0.00000
570nm	96.33420	0.87870	0.95550	0.00000
580nm	95.78800	1.01420	0.86890	0.00000
590nm	88.68560	1.11850	0.77740	0.00000
600nm	90.00620	1.12400	0.65830	0.00000
610nm	89.59910	1.03050	0.52800	0.00000
620nm	87.69870	0.85630	0.39810	0.00000
630nm	83.28860	0.64750	0.28350	0.00000
640nm	83.69920	0.43160	0.17980	0.00000
650nm	80.02680	0.26830	0.10760	0.00000
660nm	80.21460	0.15260	0.06030	0.00000
670nm	82.27780	0.08130	0.03180	0.00000
680nm	78.28420	0.04090	0.01590	0.00000
690nm	69.72130	0.01990	0.00770	0.00000
700nm	71.60910	0.00960	0.00370	0.00000
710nm	74.34900	0.00460	0.00180	0.00000
720nm	61.60400	0.00220	0.00080	0.00000
730nm	69.88560	0.00010	0.00040	0.00000
740nm	75.48630	0.00050	0.00020	0.00000

- **Valores K/S para el Cyan, Magenta y Amarillo en las cuatro primeras capas:**

Color	C847	C847	C847	C847
-------	------	------	------	------

Nº capas	1	2	3	4
Valor K/S(360)	3.13	3.70	4.06	4.43
Valor K/S(370)	2.53	2.95	3.23	3.54
Valor K/S(380)	2.07	2.41	2.67	2.97
Valor K/S(390)	1.58	1.86	2.09	2.36
Valor K/S(400)	0.88	1.07	1.24	1.46
Valor K/S(410)	0.26	0.36	0.47	0.60
Valor K/S(420)	0.05	0.10	0.15	0.23
Valor K/S(430)	0.01	0.03	0.07	0.11
Valor K/S(440)	0.00	0.01	0.03	0.06
Valor K/S(450)	0.00	0.01	0.02	0.04
Valor K/S(460)	0.00	0.01	0.03	0.04
Valor K/S(470)	0.01	0.01	0.02	0.04
Valor K/S(480)	0.01	0.02	0.03	0.05
Valor K/S(490)	0.01	0.03	0.04	0.06
Valor K/S(500)	0.02	0.04	0.06	0.08
Valor K/S(510)	0.03	0.06	0.09	0.13
Valor K/S(520)	0.05	0.10	0.15	0.21
Valor K/S(530)	0.08	0.16	0.24	0.34
Valor K/S(540)	0.13	0.25	0.37	0.52
Valor K/S(550)	0.21	0.39	0.58	0.81
Valor K/S(560)	0.33	0.62	0.89	1.23
Valor K/S(570)	0.51	0.91	1.29	1.75
Valor K/S(580)	0.69	1.22	1.70	2.28
Valor K/S(590)	0.88	1.52	2.08	2.73
Valor K/S(600)	1.08	1.81	2.43	3.12
Valor K/S(610)	1.24	2.02	2.67	3.35
Valor K/S(620)	1.29	2.08	2.72	3.38
Valor K/S(630)	1.26	2.03	2.64	3.27
Valor K/S(640)	1.20	1.93	2.52	3.13
Valor K/S(650)	1.16	1.86	2.43	3.01
Valor K/S(660)	1.22	1.90	2.45	3.02
Valor K/S(670)	1.32	1.99	2.53	3.07
Valor K/S(680)	1.26	1.91	2.43	2.96
Valor K/S(690)	1.03	1.62	2.10	2.61
Valor K/S(700)	0.77	1.27	1.71	2.18
Valor K/S(710)	0.58	1.00	1.37	1.78
Valor K/S(720)	0.44	0.78	1.10	1.45
Valor K/S(730)	0.33	0.62	0.88	1.18
Valor K/S(740)	0.23	0.45	0.66	0.91
Color	M965	M965	M965	M965
Nº capas	1	2	3	4
Valor K/S(360)	3.61	4.15	3.42	3.71
Valor K/S(370)	2.79	3.21	2.88	3.13
Valor K/S(380)	2.34	2.73	2.63	2.90
Valor K/S(390)	1.99	2.41	2.49	2.81
Valor K/S(400)	1.40	1.83	2.06	2.43
Valor K/S(410)	0.73	1.10	1.40	1.77
Valor K/S(420)	0.39	0.70	0.99	1.33
Valor K/S(430)	0.30	0.58	0.84	1.15
Valor K/S(440)	0.36	0.68	0.98	1.34
Valor K/S(450)	0.63	1.07	1.46	1.93

Valor K/S(460)	1.12	1.74	2.24	2.84
Valor K/S(470)	1.75	2.51	3.07	3.76
Valor K/S(480)	2.50	3.33	3.89	4.60
Valor K/S(490)	3.27	4.05	4.51	5.12
Valor K/S(500)	3.99	4.63	4.92	5.23
Valor K/S(510)	4.45	4.99	5.16	5.21
Valor K/S(520)	4.62	5.14	5.27	5.21
Valor K/S(530)	4.82	5.25	5.29	5.08
Valor K/S(540)	4.96	5.24	5.08	4.63
Valor K/S(550)	4.92	5.10	4.79	4.18
Valor K/S(560)	4.60	4.85	4.54	3.92
Valor K/S(570)	3.80	4.34	4.27	3.82
Valor K/S(580)	2.25	3.04	3.41	3.41
Valor K/S(590)	1.00	1.59	2.05	2.35
Valor K/S(600)	0.36	0.66	0.92	1.17
Valor K/S(610)	0.12	0.23	0.34	0.47
Valor K/S(620)	0.04	0.08	0.12	0.17
Valor K/S(630)	0.02	0.04	0.06	0.08
Valor K/S(640)	0.01	0.02	0.04	0.05
Valor K/S(650)	0.01	0.02	0.03	0.04
Valor K/S(660)	0.01	0.02	0.02	0.03
Valor K/S(670)	0.01	0.02	0.02	0.02
Valor K/S(680)	0.01	0.01	0.02	0.02
Valor K/S(690)	0.01	0.01	0.01	0.01
Valor K/S(700)	0.00	0.01	0.01	0.01
Valor K/S(710)	0.00	0.00	0.00	0.00
Valor K/S(720)	0.00	0.00	0.00	0.00
Valor K/S(730)	0.00	0.00	0.00	0.00
Valor K/S(740)	0.00	0.00	0.00	0.00
Color	Y567	Y567	Y567	Y567
Nº capas	1	2	3	4
Valor K/S(360)	4.53	5.16	5.50	5.95
Valor K/S(370)	3.89	4.35	4.58	4.89
Valor K/S(380)	3.72	4.15	4.36	4.62
Valor K/S(390)	3.69	4.20	4.42	4.68
Valor K/S(400)	3.49	4.09	4.36	4.67
Valor K/S(410)	3.04	3.76	4.07	4.46
Valor K/S(420)	2.84	3.61	3.95	4.35
Valor K/S(430)	2.68	3.46	3.80	4.17
Valor K/S(440)	2.46	3.26	3.61	3.98
Valor K/S(450)	2.26	3.08	3.45	3.83
Valor K/S(460)	1.93	2.77	3.17	3.58
Valor K/S(470)	1.48	2.29	2.74	3.23
Valor K/S(480)	0.95	1.60	2.01	2.52
Valor K/S(490)	0.54	0.99	1.31	1.74
Valor K/S(500)	0.22	0.45	0.61	0.86
Valor K/S(510)	0.08	0.16	0.23	0.33
Valor K/S(520)	0.03	0.06	0.08	0.11
Valor K/S(530)	0.02	0.03	0.03	0.05
Valor K/S(540)	0.02	0.02	0.02	0.03
Valor K/S(550)	0.01	0.02	0.02	0.02
Valor K/S(560)	0.01	0.02	0.02	0.02

Valor K/S(570)	0.01	0.02	0.02	0.02
Valor K/S(580)	0.01	0.01	0.01	0.02
Valor K/S(590)	0.01	0.01	0.01	0.02
Valor K/S(600)	0.01	0.01	0.01	0.01
Valor K/S(610)	0.01	0.01	0.01	0.01
Valor K/S(620)	0.01	0.01	0.01	0.01
Valor K/S(630)	0.01	0.01	0.01	0.01
Valor K/S(640)	0.01	0.01	0.01	0.01
Valor K/S(650)	0.00	0.01	0.01	0.01
Valor K/S(660)	0.01	0.01	0.01	0.01
Valor K/S(670)	0.01	0.01	0.01	0.01
Valor K/S(680)	0.01	0.01	0.01	0.01
Valor K/S(690)	0.01	0.01	0.01	0.01
Valor K/S(700)	0.00	0.00	0.00	0.00
Valor K/S(710)	0.00	0.00	0.00	0.00
Valor K/S(720)	0.00	0.00	0.00	0.00
Valor K/S(730)	0.00	0.00	0.00	0.00
Valor K/S(740)	0.00	0.00	0.00	0.00

- **Muestras realizadas con cada rotulador y mezclar realizadas para el 2º método de predicción**